

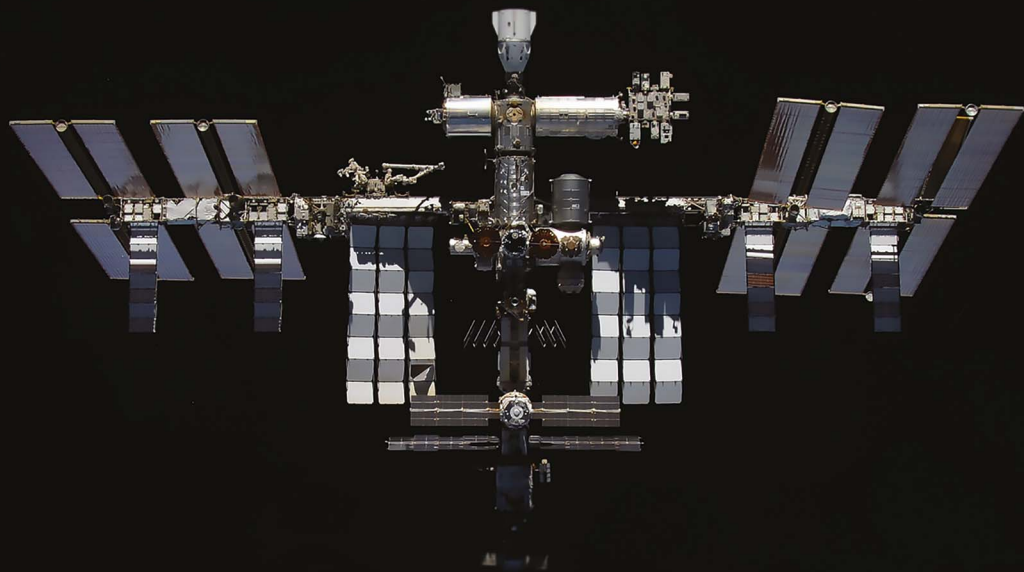
ЗЕМЛЯ И ВСЕЛЕННАЯ

№2 (355)

МАРТ-АПРЕЛЬ, 2024

ISSN 0044-3948

астрономия
геофизика
космонавтика



Использование пилотируемых космических комплексов для проведения научных исследований

МОНИТОРИНГ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

О ЧЕМ ЗВУЧАТ МЕТЕОРЫ





НАУКА
— 1727 —

**ПОДПИШИТЕСЬ НА ЖУРНАЛЫ
ИЗДАТЕЛЬСТВА «НАУКА»**

печатные и электронные версии

В ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИНЕ NAUKABOOKS.RU

- ⇒ Зайдите на сайт.
- ⇒ Выберите журнал.
- ⇒ Укажите контактные данные получателя.
- ⇒ Оплатите заказ онлайн.

Отдельные номера журналов можно купить
в магазине «Академкнига» по адресу:
г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1.



ПО E-MAIL И ТЕЛЕФОНУ

journals@naukapublishers.ru или +7(495) 276-77-35

Сообщите, на какие журналы вы хотите подписаться, а также
свои контактные данные. Менеджер поможет оформить подписку.

ЧЕРЕЗ ПОДПИСНЫЕ АГЕНТСТВА



Почта России podpiska.pochta.ru
Урал-Пресс ural-press.ru
Пресса России pressa-rf.ru
ПрессИнформ presskiosk.ru
Ивис ivis.ru **НЭБ** elibrary.ru

На странице журнала
размещена информация
о его стоимости и условиях
доставки

Обязательно проверьте,
что правильно указали
контактные данные
получателя

ЗЕМЛЯ И

№2 (356)

МАРТ-АПРЕЛЬ, 2024

ISSN 0044-3948

астрономия
геофизика
космонавтика

ВСЕЛЕННАЯ

Научно-популярный журнал
Российской академии наук
Издается под руководством
Президиума РАН
Выходит с января 1965 года
6 раз в год
«Наука»
Москва

На обложке:

Экипаж пилотируемого
корабля «Союз МС-19» после
расстыковки с Международной
космической станцией
30 марта 2022 года осуществил
фотосъемку российского сегмента
в окончательной конфигурации
и самой МКС. Пресс-служба
Госкорпорации «Роскосмос»
благодарит Ракетно-космическую
корпорацию «Энергия» и Центр
управления полетами ЦНИИмаш
(входят в состав Роскосмоса)
за содействие в реализации
данной операции и передачи
фотоматериалов!
Фотография: ГК «Роскосмос»,
<https://www.roscosmos.ru/34760/>

В НОМЕРЕ:

Колонка главного редактора	3
ЗЕЛЕНЬ Л.М., ПЕТРУКОВИЧ А.А., ЗАРУБИН Д.С. Использование пилотируемых космических комплексов для проведения научных исследований	7
БЕЛЯЕВ М.Ю. Изучение Земли в эксперименте «Ураган»	24
ПЕТРОВ О.Ф., ЗОБНИН А.В., ЛИПАЕВ А.М., УСАЧЕВ А.Д. Эксперимент на космической аппаратуре «Плазменный кристалл-4»	44
ШУРШАКОВ В.А., ИВАНОВА О.А., КАРЦЕВ И.С. Фантомы-свидетели, космонавты и радиация	63
МИТРОФАНОВ И.Г., ЛИТВАК М.Л., ГОЛОВИН Д.В., КОЗЫРЕВ А.С., МОКРОУСОВ М.И., ПЕКОВ А.Н., ТРЕТЬЯКОВ В.И. Эксперимент «БТН-Нейтрон»: изучение радиационного фона на борту МКС и РОС	77
ИПАТОВ А.В., ВЕДЕШИН Л.А., ГЕРАСЮТИН С.А. Мониторинг космического мусора и перспективы освоения околоземного космического пространства	91
МОРОЗОВА Т.И. О чем звучат метеоры	109

Коротко и интересно

Вулканы Ио продолжают непрерывно извергаться уже 4.5 миллиарда лет	116
Активность гейзеров на Энцеладе регулирует движение льда	117
Table of Content	119

© Российская академия наук, 2024

© Редколлегия журнала «Земля и Вселенная» (составитель), 2024

© ФГБУ «Издательство «Наука», 2024

Редакционная коллегия:

главный редактор
академик Л.М. ЗЕЛЕНЫЙ,
летчик-космонавт
П.В. ВИНОГРАДОВ,
зам. главного редактора
кандидат филолог. наук
О.В. ЗАКУТНЯЯ,
доктор исторических наук
К.В. ИВАНОВ,
летчик-космонавт
А.Ю. КАЛЕРИ,
кандидат физ.-мат. наук
О.Ю. ЛАВРОВА,
член-корр. РАН
А.А. ЛУТОВИНОВ,
зам. главного редактора
доктор физ.-мат. наук
О.Ю. МАЛКОВ,
доктор физ.-мат. наук
И.Г. МИТРОФАНОВ,
академик И.И. МОХОВ,
член-корр. РАН
И.Д. НОВИКОВ,
член-корр. РАН
К.А. ПОСТНОВ,
доктор физ.-мат. наук
М.В. РОДКИН,
научный директор
Московского планетария
Ф.Б. РУБЛЕВА,
член-корр. РАН
А.Л. СОБИСЕВИЧ,
член-корр. РАН
О.Н. СОЛОМИНА,
академик В.А. СОЛОВЬЕВ,
академик
А.М. ЧЕРЕПАЩУК,
доктор физ.-мат. наук
В.В. ШЕВЧЕНКО,
член-корр. РАН
Б.М. ШУСТОВ

Editorial Board:

Editor-in-chief
Acad. Dr. Lev M. ZELENYI
Acad. Dr. Anatoly M. CHEREPASCHUK
Dr. Konstantin V. IVANOV
Pilot-cosmonaut Alexander Yu. KALERI
Dr. Olga Yu. LAVROVA
RAS Corr. Member Dr. Alexander A. LUTOVINOV
Deputy Editor-in-chief
Dr. Oleg Yu. MALKOV
Dr. Igor G. MITROFANOV
Acad. Dr. Igor I. MOKHOV
RAS Corr. Member Dr. Igor D. NOVIKOV
RAS Corr. Member Dr. Konstantin A. POSTNOV
Dr. Mikhail V. RODKIN
Faina B. RUBLEVA
Dr. Vladislav V. SHEVCHENKO
RAS Corr. Member Dr. Boris M. SHUSTOV
RAS Corr. Member Dr. Alexey L. SOBISEVICH
RAS Corr. Member Dr. Olga N. SOLOMINA
RAS Corr. Member Dr. Vladimir A. SOLOVYEV
Pilot-cosmonaut Pavel V. VINOGRADOV
Deputy Editor-in-chief
Dr. Olga V. ZAKUTNYAYA

Колонка главного редактора

Дорогие читатели, коллеги, друзья!

Номер «Земли и Вселенной», который лежит перед Вами, в основном посвящен знаменательному событию в истории мировой космонавтики – 25-летию начала работы Международной космической станции (МКС).

28 ноября 1998 г. началось строительство станции – с космодрома «Байконур» был осуществлен успешный запуск ракеты-носителя «Протон» с первым модулем, функциональным грузовым блоком «Заря». 7 декабря с «Зарей» был состыкован второй элемент орбитальной станции – соединительный модуль Unity. Через два года станция пополнилась новым важным элементом – служебным модулем «Звезда». В ноябре 2000 г. станция начала работу в пилотируемом режиме. В экипаж МКС-1 входили российские космонавты Юрий Гидзенко, Сергей Крикалев и американский астронавт Уильям Шепард.

Так началось строительство первого в истории международного «космического дома», насчитывающего сейчас уже 15 основных модулей. Мне кажется, это великое достижение человечества. Я неоднократно предлагал выдвижение инициаторов строительства МКС на Нобелевскую премию мира. Важно, что, несмотря на все особенности текущего момента, станция продолжает работу, и сейчас регулярно с Байконура и мыса Канаверал в США к станции стартуют международные экспедиции, состоящие из граждан разных стран. В общем, можно пошу-



Фото: Т.Д. Жаркова, ИКИ РАН

тить, что если первая попытка человечества построить Вавилонскую башню провалилась, то вторая, в сложном и наполненном конфликтами XX веке, все же полностью удалась.

Строительство станции продолжается и в последние годы. Летом 2021 г. многоцелевой лабораторный модуль «Наука», предназначенный для реализации отечественной программы научно-прикладных исследований и экспериментов, успешно пристыковался к станции и, наконец, в конце 2021 г. к модулю «Наука» был пристыкован универсальный узловой модуль «Причал», предназначенный для одновременного приема грузовых и пилотируемых кораблей.

Теперь о грустном. МКС, как и всё в подлунном мире, не вечна – ее ресурс вырабатывается, возникает все больше мелких, а иногда и крупных неполадок, требующих все больше времени экипажей для их исправления (а это ведь самый ценный ресурс станции). Окончательный срок эксплуатации сейчас трудно назвать, оптимисты говорят о 2030 году, пессимисты о 2028... Посмотрим. В любом случае, отечественная пилотируемая космонавтика про-



Открытие юбилейной XV Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос» 15 ноября 2023 г. в Центре подготовки космонавтов. Выступает начальник Центра М.М. Харламов. Фото: Пресс-служба ЦПК, Андрей Шелепин, Павел Швец

должит свое развитие как на околоземных (принято решение о создании российской высокоширотной орбитальной станции РОС), так и, надеемся, на дальних лунных и даже марсианских орбитах.

Само создание станции и ее более чем четвертьвековое успешное функционирование в околоземном космическом пространстве, несомненно, – великое технологическое достижение человечества, но все же главное – это целевая задача, а именно проведение на борту станции научных и научно-технологических экспериментов.

Присутствие на станции космонавтов-исследователей представляет уникальные возможности отладки бортовой аппаратуры, предназначенной в дальнейшем для работы на ав-

томатических космических аппаратах. Инфраструктура станции неоднократно использовалась и будет использоваться для запуска научных и научно-образовательных микроспутников. Пожалуй, наиболее яркий пример таких экспериментов – академический микроспутник «Чибис», созданный для исследования механизмов грозовых разрядов и других проявлений атмосферного электричества.

Особую и, на наш взгляд, наиболее результативную группу исследований, проводившихся в эти годы на МКС, составляют отечественные медико-биологические эксперименты. Их постановщики добились превосходных результатов и фактически сформировали новую науку – медицину здорового человека.



Выездная сессия Третьей международной конференции «Наука на МКС» 23 ноября 2023 г. в центре «Космонавтика и авиация» на ВДНХ. Выступает С.К. Крикалев, исполнительный директор по пилотируемым программам ГК «Роскосмос». Фото: Т.Д. Жаркова, ИКИ РАН

Но все же нужно признать, что наука, которая делается на МКС, обделена вниманием СМИ и недостаточно представлена в публичном пространстве. Чтобы преодолеть эту несправедливость, Российская академия наук и Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос» уже третий раз проводят научно-практическую конференцию «Наука на МКС». Последняя такая конференция, приуроченная к 25-летию юбилею станции, состоялась в ноябре прошлого года на площадке ИКИ РАН, Центра подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина и в павильоне «Космос» на ВДНХ. Взгляните, пожалуйста, на несколько фотографий, сделанных во время этих мероприятий.

На конференции было сделано более сотни интересных докладов и сообщений. Мы, конечно, не сможем сразу рассказать обо всех, так что для печати пришлось выбрать несколько, я бы сказал, наиболее «физических» из них.

Владимир Евгеньевич Фортвов в свое время инициировал серию экспериментов по самоорганизации пылевой плазмы в невесомости. Эксперименты начались еще на станции «Мир» и продолжены на МКС. В статье О.Ф. Петрова и соавторов рассказывается о результатах «Плазменного кристалла – 4» – уже четвертого поколения этих замечательных установок.

В статье И.М. Митрофанова и его коллег подробно описывается проведение эксперимента по измерению нейтронных фоновых потоков у Земли.



Выставка в ИКИ РАН. Космонавт Олег Артемьев у стендов экспериментов МВН и «Русалка». Фото: Т.Д. Жаркова, ИКИ РАН

Приборы этой команды проводят сходные измерения у Луны и Марса. В ближайшие годы ожидается проведение подобных экспериментов в окрестности Меркурия. Это дает уникальную возможность сравнить радиационные потоки в окрестности всех этих небесных тел.

Радиации посвящена и статья В.А. Шуршакова и соавторов, посвященная измерениям радиационных нагрузок в околоземном космосе, их влиянию на человека и способам противостоять ему.

Из самых важных космических новостей. В июне состоялся забор проб грунта на обратной стороне Луны китайской экспедицией «Чанъэ-6». Сейчас, когда пишутся эти строки, забранные образцы еще находятся на окололунной орбите и ждут своей очереди доставки на Землю. К моменту выхода журнала они уже окажутся в земных лабораториях,

а потом, как это произошло ранее с образцами, доставленными «Чанъэ-5», будут переданы для анализа в лаборатории других стран, в том числе и России. Нам пока есть, чем ответить на этот щедрый жест китайских ученых, – в хранилище Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН хранятся образцы, доставленные отечественными миссиями «Луна-16, -20, -24». Спасибо великим советским конструкторам и инженерам. Ведь проект российской доставки лунного грунта «Луна-28» ожидается не ранее 2030 г. Что тут скажешь: не впадать в уныние, работать, учиться у наших успешных коллег – как когда-то они учились у нас. Дорогу ведь кто и осилит, то только идущий.

*Главный редактор
журнала «Земля и Вселенная»
академик Лев Матвеевич Зелёный*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



ЗЕЛЕНЬКИЙ Лев Матвеевич,

академик РАН,
заместитель председателя Совета по космосу РАН

ПЕТРУКОВИЧ Анатолий Алексеевич,

член-корреспондент РАН

ЗАРУБИН Дмитрий Сергеевич

ведущий инженер

Институт космических исследований РАН



DOI: 10.7868/50044394824020014

Создание и эксплуатация пилотируемых станций создает «локомотивный» эффект для решения разнообразных задач по освоению космоса человеком и использованию результатов космической деятельности на Земле.

Проведение научных исследований – одно из наиболее важных направлений целевого использования для пилотируемых космических комплексов (ПКК), наряду с вопросами обеспечения присутствия человека в космосе, междуна-

родной интеграции, а также развития коммерческой составляющей.

Богатый опыт организации научных исследований получен в результате создания и эксплуатации орбитально-го комплекса «Мир». Сегодня эта работа успешно проводится на Российском сегменте Международной космической станции (МКС), в том числе в рамках широкой и уникальной международной кооперации. Научное сообщество поддерживает недавнее решение

Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» (ГК «Роскосмос») и агентств-партнеров о продлении сроков эксплуатации МКС.

Завтрашний день науки на ПКК связан с созданием новой Российской орбитальной станции (РОС) на высокой широте и, безусловно, с развитием работ по лунной тематике в России и мире.

Для науки орбитальные станции – это лаборатории с уникальным сочетанием возможностей. Это, во-первых, собственно проведение исследований в космосе; во-вторых, участие в них человека; и наконец, в-третьих, – это длительная временная база для космических исследований.

Изучение солнечно-земных связей на ПКК включает в себя вопросы оптических атмосферных явлений естественного и техногенного происхождения, потоков микрочастиц на околоземных орбитах, радиозондирование верхних слоев атмосферы, мониторинга плазменно-волновых процессов и другие. Размещение будущей станции РОС на орбите с высоким (96.8°) наклоном расширит диапазон этих исследований в части взаимодействия станции с потоками плазмы магнитосферы, галактическими и солнечными космическими лучами.

Исследования Земли из космоса на ПКК вносят весомый вклад в развитие дистанционного зондирования Земли, как научного направления. Ключевые задачи включают в себя:

- 1) отработку перспективной аппаратуры в режиме космического эксперимента, в том числе для последующего масштабирования на автоматических КА;

- 2) создание и отработку новых методов измерений и обработки их результатов. Высокое наклонение будущей станции также увеличит возможности для исследований за счет возможности наблюдения всей земной поверхности,

включая полярные регионы, и кратности орбиты – пролет над одной и той же территорией каждые 3–5 суток.

Выполнение медико-биологических исследований уже сегодня обеспечило возможность постоянного присутствия человека в космосе. Дальнейшие исследования станут важным этапом подготовки пилотируемого освоения дальнего космоса, включая создание посещаемых налунных научных станций и полеты космонавтов на Марс.

Далее рассмотрим вопросы организации, эффективности и перспектив проведения научных исследований на ПКК.

ВВОДНОЕ СЛОВО

Пилотируемый космос – одно из наиболее важных, заметных и успешных направлений космической деятельности, в самом прямом смысле приближает человека к звездам. Пилотируемая космонавтика преодолела за несколько десятилетий огромный путь – от первых кратковременных полетов до постоянного присутствия человека на орбите. Перед нами открылись широкие возможности для решения задач по различным передовым направлениям, с выполнением работ космонавтов внутри герметичного объема станций и в открытом космосе.

Россия в пилотируемой космонавтике является не только первопроходцем, но и сегодня, обладая всем комплексом средств доступа в космическое пространство (космодромы, ракеты-носители, транспортные и грузовые корабли, орбитальная станция), безусловной страной-лидером, наряду с США и Китаем.

Экспансия человечества в новые области является общеисторическим процессом. Сегодня мы свидетели и участники первых, но уже устойчивых шагов человека в космос:

- основной объем пилотируемых полетов приходится на низкие околоземные орбиты (~ 400 км над Землей);
- с 1986 г. обеспечивается постоянное присутствие человека на околоземной орбите;
- перемещение в космосе (таблица 1) определяется не столько расстоянием, сколько характеристической скоростью,

рассчитываемой по формуле, разработанной нашими соотечественниками И.В. Мещерским и К.Э. Циолковским.

Околоземная орбита является своего рода необходимым и действующим «космическим портом» для дальнейшего освоения космического пространства.

Таблица 1

Околоземная орбита и окололунное пространство

№	Показатель	Околоземная орбита	Окололунное пространство	Примечание
1	Дистанция до Земли, км	~ 450	~ 380 000	
2	Характеристическая скорость, м/с	~ 8000	~ 11 200	Околоземная орбита – обязательный «промежуточный пункт» при перелете к Луне и не менее 70% от затрат, необходимых для доступа в окололунное пространство.



Фото из личных архивов космонавтов ГК «Роскосмос» А.Ю. Кикиной и О.Г. Артемьева

Сегодня, в первой половине XXI в., происходит важный переход в мировой пилотируемой космонавтике от освоения к использованию околоземного космического пространства. Одновременно развиваются по количеству и масштабу задачи программы исследования окололунного пространства и Луны автоматическими миссиями, которые создают значимые предпосылки для начала пилотируемых миссий и последующего обеспечения устойчивого присутствия в окололунном пространстве и на Луне.

ИСТОРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ПИЛОТИРУЕМЫХ КОРАБЛЯХ И СТАНЦИЯХ

Для первых пилотируемых полетов безусловным приоритетом было решение базовых научно-технических задач доступа в космос. Результатом этой работы стали значимые исторические

достижения, отметим лишь некоторые из них: 1961 – первый полет Ю.А. Гагарина в космос; 1963 – полет первой женщины-космонавта В.В. Терешковой; 1965 – первый выход А.А. Леонова в космос. Эти задачи получили свое значительное развитие в дальнейшем: 1975 г. – миссия «Союз-Аполлон» – первая международная миссия, совместный полет советского и американского кораблей; первая международная программа «Интеркосмос»; 1986 г. – первый перелет В.А. Соловьева и Л.Д. Кизима между двумя пилотируемыми станциями «Салют-7» и «Мир», программа «Мир-Шаттл» – полеты американских кораблей на российскую станцию и другие достижения.

«Ресурсы» первых пилотируемых полетов для науки были незначительными (минуты/часы, граммы/килограммы), но ввиду нового характера исследований даже эти возможности позволили получить замечательные, значимые для мировой науки результаты. Были проведены исследования по



Основные этапы отечественной пилотируемой космонавтики

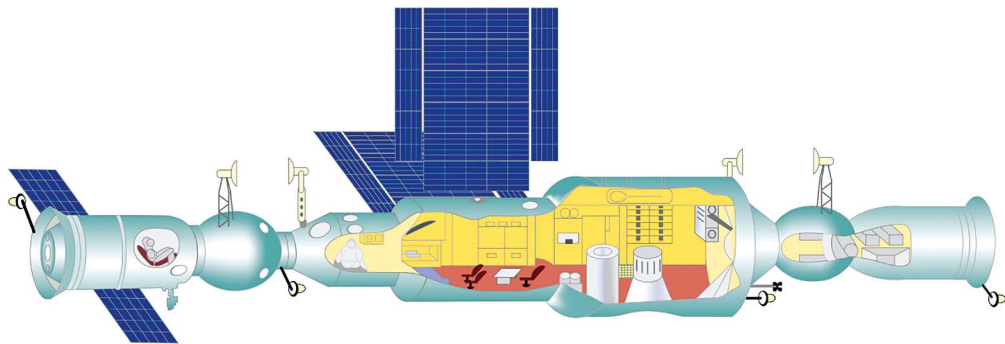


Схема станции «Салют-7».

Источник: <https://naked-science.ru/article/cosmonautics/salyut-7-9-let-ot-vzleta-do>

фундаментальным научным направлениям, которые дали революционные на тот момент знания о характере космического пространства.

Дальнейшее развитие научных исследований на пилотируемых комплексах связано с развитием космической науки уже как «инструмента» для получения новых научных знаний в различных областях, для Земли и для дальнейшего освоения космоса. Были сформированы лаборатории, институты – в том числе по инициативе президента Академии наук СССР М.В. Келдыша, был создан Институт космических исследований. Также формировались и активно развивались кооперационные связи между академическими организациями и промышленностью: наука предоставляла решения для научно-технических проблем космонавтики, а космонавтика – ресурсы для научных исследований за пределами Земли.

Ресурсы пилотируемых комплексов для научных исследований – один из основных факторов для формирования и реализации соответствующих научных программ. Речь идет о времени экипажа (часы внекорабельной и внутрикорабельной деятельности в неделю/месяц/год), объемах, электро-

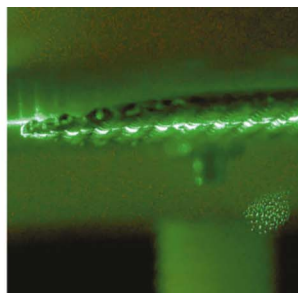
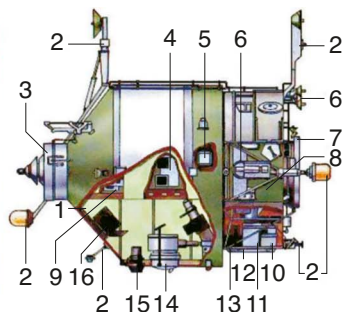
энергии, количестве мест для научной аппаратуры внутри и снаружи гермообъема и так далее.

В результате перехода пилотируемой космонавтики от этапа автономных полетов пилотируемых кораблей к эксплуатации посещаемых станций начиная с 1971 г. длительность миссий увеличилась кратно. Корабли находились в составе станции без расхода ресурса автономного полета. Появилась возможность размещать средства медицинского обеспечения и тренажеры в составе станции для парирования негативного влияния факторов космического пространства на здоровье экипажа.

В результате значительно возросли возможности ПКК для проведения научных исследований:

- время экипажей на науку;
- размещение научной аппаратуры на специализированных рабочих местах внутри и снаружи станции;
- выполнение исследования на длительной временной базе с участием нескольких экипажей подряд.

Работы по созданию первых орбитальных станций выполнялись очень быстро. Так, станция «Салют-1» была создана всего за два (!) года. Ряд решений со стороны головного конструктора



Слева: орбитальный комплекс «Мир»; в центре: астрофизический модуль «Квант» (схема); справа: эксперимент «Плазменный кристалл»

торского бюро – НПО «Энергия» позволил повысить темпы разработки научной аппаратуры и ее выхода на борт: аппаратура создавалась в «экспериментальном контуре», для которого объем требований был значительно снижен по сравнению со штатными системами.

В ходе запусков и эксплуатации первых орбитальных станций были решены многие важные для науки и техники задачи. Отметим развитие служебных систем (возможность одновременной стыковки нескольких кораблей, экономичные системы ориентации, более совершенные системы энергоснабжения и другие); уникальный опыт восстановления работоспособности орбитальной станции «Салют-7» (работы выполнялись космонавтами В.А. Джанибековым и В.П. Савиных); формирование и начало реализации программы международного сотрудничества «Интеркосмос», которая позволила не только решить вопросы предоставления доступа в космос для стран-партнеров (актуальные и сегодня!), но также отработать принципы и подходы международной кооперации при проведении научных исследований на ПКК.

Вехой в истории российской и мировой космонавтики является созда-

ние и эксплуатация орбитального комплекса «Мир».

ОК «Мир» представлял собой первую в мире многомодульную станцию и долговременную многопрофильную лабораторию.

Были созданы модули малые специализированные модули для научных исследований, в том числе астрофизический модуль «Квант».

Впервые в мире выполнен перенос части научной аппаратуры со станции «Салют-7» на ОК «Мир» в 1986 г.

Получило свое развитие программа международного сотрудничества «Интеркосмос». Была сформирован и успешно реализована программа «Мир-Шаттл» (девять полетов американских космических челноков), которая стала основой для отработки подходов к сотрудничеству между Россией и США в области пилотируемой космонавтики и, в целом, в области использования космического пространства в мирных целях.

На станции «Мир» функционировало более 200 единиц уникальной научной аппаратуры. Получили значимое развитие исследования в области материаловедения, исследования Земли из космоса, в том числе в радиодиапазоне, что позволяло проводить наблюдения

Действующая программа



5 космических агентств
15 – стран-партнёров,
более 100 стран участников

Система соглашений и
механизмов управления
программой

2 сегмента

Резервирование
основных систем



Программа Международной космической станции. На врезе: Ю.Н. Коптев, руководитель Росавиакосмоса (1992–2004), руководитель работ по формированию программы МКС с российской стороны

независимо от погоды и времени суток; медико-биологические исследования, в том числе установлено несколько рекордов по длительности экспедиций (В.В. Поляков, С.В. Авдеев, С.К. Крикалев); телемедицина; исследования космической радиации, солнечно-земных связей и другие.

СЕГОДНЯШНИЙ ДЕНЬ. МКС. НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ПКК

Сегодня на околоземной орбите создана и эксплуатируется Международная космическая станция, состоящая из двух сегментов – российского и американского.

МКС можно увидеть в московском небе невооруженным глазом: станция второй по яркости (после Луны) объект,

быстро – за 3–5 минут – пересекающий небосвод.

Партнерами по МКС являются 15 стран. Выполнение программы создания и эксплуатации станции осуществляют пять ведущих космических агентств: ГК «Роскосмос», NASA, ESA, JAXA, Канадское космическое агентство. Более 100 стран являются участниками программы.

Результаты России по программе станции:

- создание и запуск первого модуля МКС – Функционального грузового блока «Заря», созданного российской стороной в рамках соглашений с США и запущенного в 1998 г. с использованием ракеты-носителя «Протон»;
- организация и успешное выполнение первых в мире полностью коммерческих полетов в космос на борт станции;

- реализация российско-европейских программ создания грузовых космических кораблей ATV;

- реализация масштабной научной программы, в том числе с широкой международной кооперацией и др.;

- ключевая роль в транспортно-техническом обеспечении станции. В течение нескольких лет запуски пилотируемых и грузовых кораблей осуществляла только Российская Федерация, обеспечив тем самым сохранение и устойчивость программы МКС.

Международная космическая станция предоставляет сегодня значимые возможности для науки, которые определяются многомодульной конфигурацией, наличием двух сегментов и нескольких транспортных систем, резервированием основных служебных систем на борту, постоянным присутствием экипажа и длительными миссиями (полгода и более), сформированными механизмами формирования и реализации научной программы и возможностями международной координации научных программ.

Научные исследования выполняются на российском сегменте МКС в рамках долгосрочной программы целевых работ (ДПЦР).

Решение ГК «Роскосмос» о продлении эксплуатации РС МКС, как минимум до 2028 г. и соответствующее решение партнеров о продлении эксплуатации АС МКС создают сегодня необходимые предпосылки для развития программ целевого использования на МКС, включая проведение научных исследований.

Научно-прикладные исследования и эксперименты на пилотируемых комплексах проводятся по восьми основным направлениям: космическая биология и физиология, космическое материаловедение; исследования Земли из космоса; Солнечная система; внеатмосферная астрономия; физика космических лучей; технические исследования и технологии пилотируемых космических полетов; космическое образование.

Их координирует Координационный научно-технический совет (КНТС) ГК «Роскосмос». Секции КНТС возглав-

Организация научных исследований на РС МКС

Орбитальный сегмент - 6 модулей
(включая ФГБ «Заря» - собственность НАСА)

Система транспортно-технического обеспечения

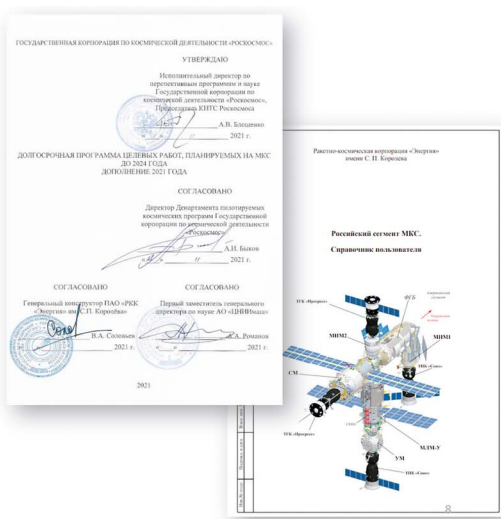
Наземный сегмент

Система организации выполнения научных исследований на базе КНТС Роскосмоса



**КАТАЛОГ
НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ И ОБОРУДОВАНИЯ
НА РОССИЙСКОМ СЕГМЕНТЕ МКС**

<https://www.roscosmos.ru/>



1. Гипогравитационные условия
2. Средства медицинского обеспечения для осуществления длительных автономных космических полетов
3. Технологии профилактики длительного воздействия невесомости
4. Технологии применения средств физической, фармакологической защиты членов экипажа от радиации
5. Технологии обеспечения психоэмоционального здоровья членов экипажей
6. Элементов биологической системы жизнеобеспечения (БСЖО)



Ю.А.Гагарин



В.В.Поляков

Один виток → 437 суток

Время экипажа = ресурс для целевого использования, в том числе для научных исследований

Медико-биологические исследования на пилотируемых космических комплексах

ляют руководители профильных организаций госкорпорации и Российской академии наук¹.

Обратим внимание на некоторые характерные примеры задач и результатов.

К наиболее ярким результатам в направлении **«Космическая биология и физиология»** можно отнести:

- состоявшийся переход пилотируемых полетов по длительности: от одного дня до шести месяцев и более;
- внедрение результатов космической медицины на Земле (вопросы реабилитации, медицины катастроф, физиологии и др.);
- достижения в области снижения рисков пилотируемых полетов за пределы околоземных орбит.

Направление **«Солнечная система»** включает в себя три группы задач или объектов исследований:

¹ Подробные материалы по направлениям исследований и отдельным экспериментам на РС МКС приведены в сборнике тезисов докладов Третьей международной конференции «Наука на МКС», посвящённой 25-летию Международной космической станции <https://iss-science.cosmos.ru/>

– изучение околоземного космического пространства, включая различные физические процессы антропогенного и природного характера, верхних слоев атмосферы, магнитосферы и ионосферы, а также солнечно-земных связей – «космической погоды»;

- изучение Солнца и гелиофизических процессов;
- изучение планет и малых тел Солнечной системы.

Исследования в данном направлении нацелены в основном на получение фундаментальных знаний, подтверждение научных гипотез и теорий, регистрацию природных явлений и сопровождающих их физических процессов.

К характерным примерам результатов можно отнести:

а. Мониторинг сейсмических эффектов (всплесков высокоэнергичных частиц) в околоземном космическом пространстве – в рамках КЭ «Всплеск» были измерены потоки электронов и протонов радиационного пояса, галактического происхождения и атмосферного альbedo. В результате были построены стационарные распределения потоков частиц по географическим и геомаг-

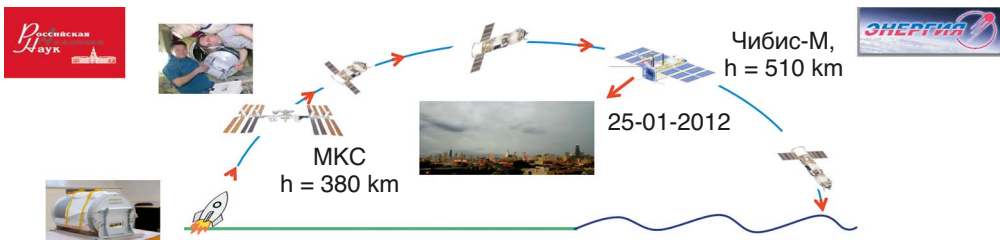


Схема запуска академического микроспутника «Чибис-М» и сам микроспутник на стенде вертикального обезвешивания в цехе Специального конструкторского бюро космического приборостроения ИКИ РАН. Фото: ИКИ РАН

нитным координатам, их питч-угловые (определяющие движение частиц относительно силовых геомагнитных линий) распределения.

б. космический эксперимент «Микроспутник» по исследованию физических процессов при атмосферных грозовых разрядах на базе микроспутника «Чибис-М» с его запуском с борта транспортно-грузового корабля «Прогресс».

В результате эксперимента были зарегистрированы электромагнитные, ультрафиолетовые, инфракрасные и гамма-излучения от высотных атмо-

сферных грозовых разрядов. Полученные и обработанные данные позволили уточнить информацию о тонкой структуре молниевых разряда, о перколяционных процессах, происходящих при подготовке и во время самого разряда, а также позволили оценить высоту возникновения разрядов и рассмотреть дискретные механизмы, происходящие в грозовом облаке. Полученные данные уменьшили имеющиеся неопределенности существующих гипотез и одновременно дали новые результаты, требующие обновленного подхода к изучению грозовых разрядов.

Этот эксперимент также позволил реализовать новый подход к созданию научной аппаратуры, при котором спутник можно назвать научным прибором. «Чибис-М» был успешно запущен с отработкой новой баллистической схемы с поднятием орбиты ТГК «Прогресс» и проработал весь срок своего баллистического существования, около трех лет. Также были отработаны разработка и изготовление микро-спутниковой платформы, ее служебных систем, транспортно-пускового контейнера, комплекса научной аппаратуры (КНА «Гроза») и методов бортовой и наземной обработки одновременных измерений с нескольких датчиков. Был сформирован наземный сегмент ИКИ РАН, который обеспечивал автономное командно-телеметрическое управление спутником, прием и обработку научных данных.

Активно развивается направление **«Исследования Земли из космоса»**. В настоящее время дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является одним из основных источников актуальной и оперативной информации о состоянии объектов на Земле и поэтому используется для решения различных научно-исследовательских и прикладных задач. Данные ДЗЗ широко применяются в гидрометеорологии, изучении климатических изменений, для обнаружения и мониторинга опасных природных и антропогенных явлений, наблюдений за состоянием экосистем, исследований и инвентаризации природных ресурсов и т.д.

Выполнение исследований в области ДЗЗ на пилотируемых (посещаемых) орбитальных комплексах обусловлено возможностью решения задач по трем основным направлениям:

- отработка новой аппаратуры на наблюдения для последующего создания АКА;

- отработка методов обработки данных по результатам измерений с использованием новой аппаратуры;

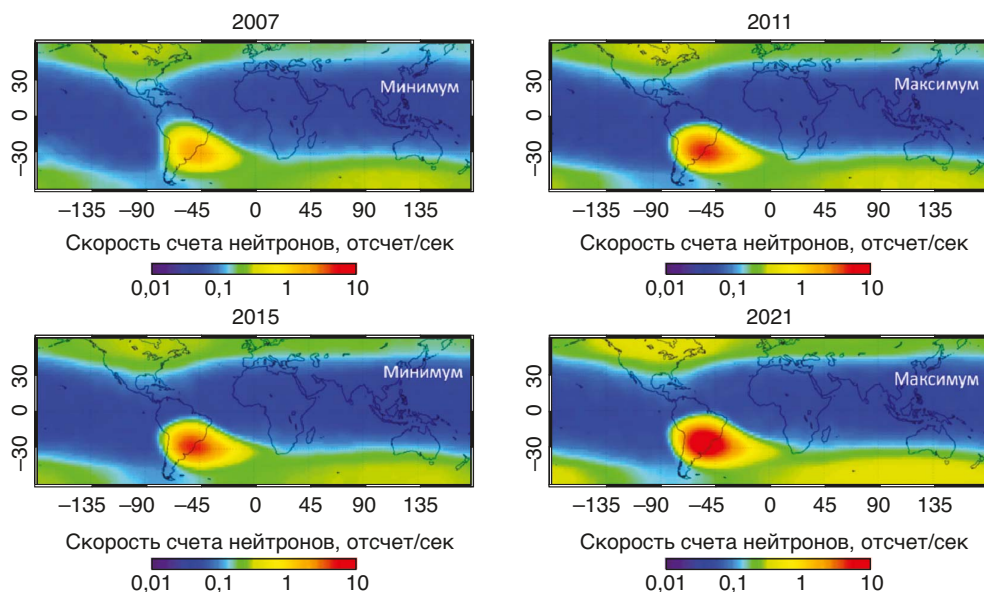
- отработка новых комплексных методов и методик обработки данных новых и традиционных (уже работающих на автоматах) систем наблюдения для демонстрации возможности достижения нового уровня решения различных задач.

Примеры таких экспериментов – «Дриада», «Конвергенция», «Климат», «Скаттерометр-L», «Ветер», «МКС-Глонасс», «МКС РСА (Р)», «Ракурс», «Фон», «Ураган».

В рамках КЭ «Ураган», например, были проведены наблюдения с использованием фото- и видеоспектральной аппаратуры. В частности, с помощью фотофиксации зоны бедствия в г. Крымске были объективно установлены причины затопления жилой зоны, вызвавшей значительный материальный ущерб и приведший к человеческим жертвам. В настоящее время в рамках КЭ «Ураган» завершаются работы по подготовке гиперспектральной аппаратуры и ИК-радиометра высокого разрешения, прорабатываются вопросы обеспечения более оперативного мониторинга в рамках эксперимента.

Исследования в рамках направления **«Физика космических лучей»** нацелены на исследования заряженных и нейтральных частиц с кинетическими энергиями от единиц мегаэлектронвольт до десятков гигаэлектронвольт, которые являются носителями информации о процессах генерации и ускорения частиц, характеристиках Солнца и гелиосферы, галактической и межгалактической среды, ранних этапах развития Вселенной.

Космические лучи позволяют проверять и уточнять наиболее фундаментальные соотношения природы: законы симметрии и их нарушения, пер-



Карты нейтронного потока для минимумов и максимумов солнечной активности, полученные в эксперименте БТН-Нейтрон на борту МКС. Изображение: ИКИ РАН

вичный нуклеосинтез и др. Особое место занимают заряженные частицы, несущие информацию о ранних стадиях эволюции Вселенной, о процессах в недрах звезд, в том числе релятивистских звезд, о процессах, приводящих к перекачке энергии из одних видов в другие. Космические лучи занимают энергетический интервал в 14 порядков величины, причем значительная часть этого интервала может быть изучена только на космических аппаратах за пределами атмосферы Земли. Исследования космических лучей на пилотируемых орбитальных станциях проводятся имеют как фундаментальное, так и прикладное значение.

К фундаментальным относятся следующие исследования космических лучей:

- аномальной компоненты космических лучей;
- химического состава и энергетического спектра космических лучей, особенно спектра протонов и более тяжелых ядер;

– потоков высокоэнергичных заряженных частиц, нейтронов, линейчатого гамма-излучения и высокоэнергичного гамма-излучения во время солнечных вспышек;

– электронов высокой энергии (до десятков ГэВ).

Внеатмосферная регистрация космических лучей различной природы позволяет получать данные о космических объектах, которые получить в ходе любых наземных экспериментов принципиально невозможно.

Прикладное изучение космических лучей связано с их воздействием на элементы конструкции, материалы и космонавтов. Ядерная компонента космических лучей имеет высокую ионизирующую способность и может вызывать различные типы изменений в твердых телах и биологических структурах.

Характерными примерами КЭ по данному направлению являются:

- «БТН-Нейтрон», «БТН-Нейтрон-2»: изучение потоков быстрых и тепловых нейтронов;



Полярное сияние, вид с борта МКС. Фото космонавта Олега Котова, источник пресс-служба ГК «Роскосмос»

– КЛПВЭ: определение химического состава и измерение энергетических спектров космических лучей;

– ИФР-1: изучение природы космофизических факторов, определяющих временную структуру флуктуаций случайных процессов при синхронных измерениях флуктуаций альфа-распада на борту МКС и в специально созданной наземной установке, имитирующей ориентацию в пространстве и движение МКС;

– УФ-Атмосфера: картография ночной атмосферы в ближнем ультрафиолетовом диапазоне широкоугольным детектором с большой апертурой и высоким пространственно-временным разрешением;

– «Платан»: изучение элементного состава и детальных энергетических спектров ядер группы железа галактических космических лучей и ионов солнечных космических лучей в интервале энергий от 30 до 200 МэВ/нуклон.

СЛЕДУЮЩИЕ ШАГИ ПИЛОТИРУЕМОЙ КОСМОНАВТИКИ. ОБЩЕМИРОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ. РОССИЙСКАЯ ОРБИТАЛЬНАЯ СТАНЦИЯ

В результате собственных поисковых работ и работ в формате международных групп ведущие космические агентства определили для себя ряд приоритетов в области освоения космоса, основными из которых являются:

- сохранение и развитие возможностей в области околоземных орбит;
- начало исследования Луны одновременно с продолжением полетов на околоземную орбиту.

Принятые в России решения о продлении эксплуатации РС МКС и о начале проектных работ по созданию новой орбитальной станции соответствуют

Следующие шаги?



1. Сохранение и развитие возможностей ведущих держав на околоземной орбите одновременно с началом лунной программы
2. МКС:
 - продление эксплуатации до 2028 года и далее;
 - увеличение числа стран-участников исследований;
 - формирование кооперации для Луны;
 - использование действующих соглашений и механизмов управления программой уже для новых проектов
3. Проектирование будущих национальных станций, в том числе с переходом на современные системы и технические интерфейсы
4. Околоземная орбита: новая область экономики и плацдарм для освоения космоса человеком. **Наука – важная попутная составляющая**

Перспективы развития пилотируемых космических комплексов

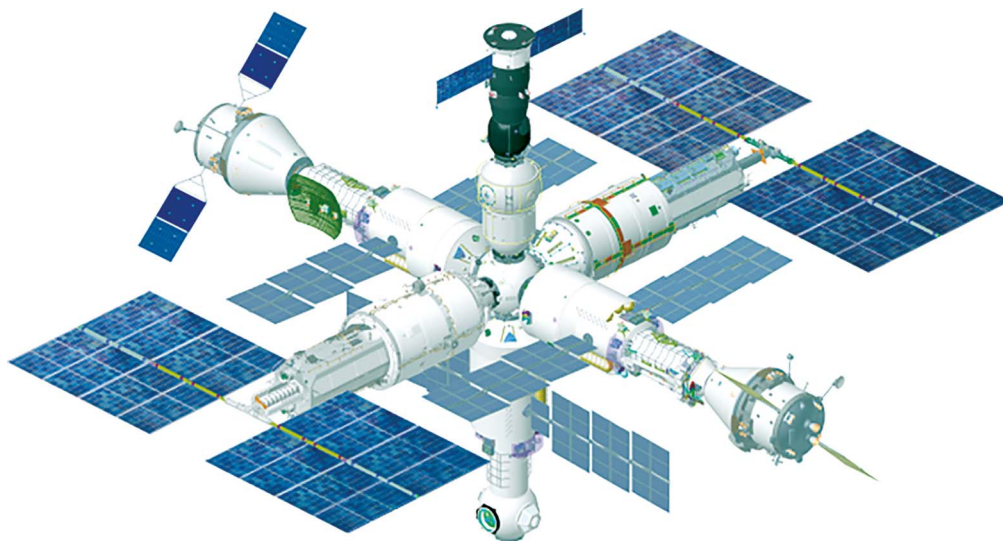
общемировым тенденциям и создают необходимые предпосылки для сохранения и развития позиций лидера и основного партнера в мировой пилотируемой космонавтике.

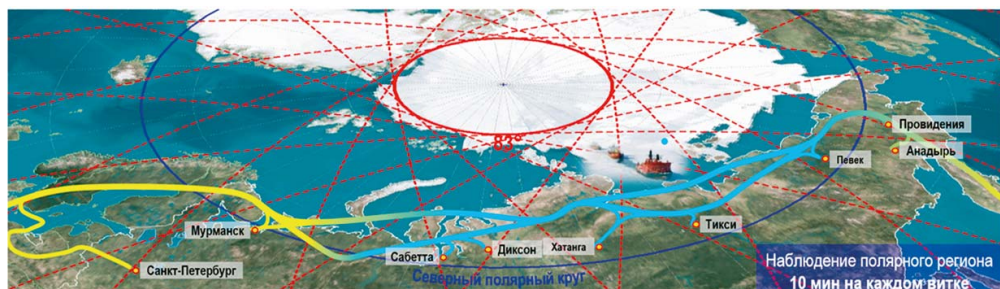
Создание РОС предполагается на орбите с наклоном 96.8° (для сравнения, наклонение орбиты МКС – 51.6°),

что создает некоторые дополнительные возможности для проведения научных исследований.

Предполагаемая орбита РОС дает равномерное в широтном отношении покрытие Земли, что актуально для дистанционных исследований территории России, особенно российской

Конфигурация Российской орбитальной станции. Проект ПАО «РКК «Энергия»





Параметры орбиты будущей станции РОС: наклонение 96.8° , что обеспечивает полный обзор Земли, включая северный морской путь (с РС МКС – 51.6° – обзор Земли – до 78%, в т.ч. до 10% территории России); кратность орбиты: проход над одной и той же территорией каждый 3–5 суток. Условия на РОС: приближенные к дальнему космосу, пребывание на открытых магнитных силовых линиях до 25% времени каждого витка



Арктики, включая акватории Северного Ледовитого океана. Важно отметить, что плотность покрытия наблюдениями средних и высоких широт на орбитах высокого наклонения возрастает с увеличением широты, поэтому недоступные для наблюдений с МКС и геостационарных орбит приполярные области, напротив, с РОС будут наблюдаться чаще, чем низкоширотные.

Солнечно-синхронные орбиты являются одним из важнейших частных случаев орбит высокого наклонения, которые наиболее часто применяются при решении задач ДЗЗ. Основным фактором в пользу выбора такого типа орбиты является фиксированное местное время пролета спутника над наблюдаемой территорией. Это обеспечивает одинаковые условия освещенности в момент времени наблюдений и фиксированное направление на источник освещения (Солнце), а также одинаковую фазу хода процессов, имеющих

суточную периодичность. К ним относятся процессы, непосредственно связанные с солнечным освещением территории, например, дневной прогрев и ночное остывание, и другие, например, гидрометеорологические процессы в атмосфере, антропогенная деятельность.

Также благодаря фиксированному времени пролета аппарата над наблюдаемой территорией появляется естественная суточная периодичность построения глобальных полей (почти) полного покрытия.

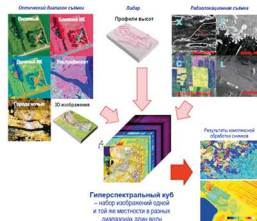
Особый интерес для исследователей по направлению «Солнечная система» также представляет зона полярных областей. Это связано с тем, что солнечные корпускулярные потоки, попадая в магнитосферу Земли, под влиянием магнитного поля, в основном, отклоняются к полюсам. Нерегулярность то усиливающегося, то ослабевающего солнечного корпускулярного излучения, изменения в составе заряженных



РАЗРАБОТКА АППАРАТУРЫ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ ЗЕМЛИ В ОПТИЧЕСКОМ, ИНФРАКРАСНОМ, И РАДИОДИАПАЗОНАХ



ДЗЗ на РОС:



Создание конкурентоспособных орбитальных средств ДЗЗ, в частности, для радиофизической съёмки и оперативного мониторинга объектов, является одной из наиболее актуальных прикладных задач космической деятельности

Основные средства ДЗЗ:

- автоматические КА (единичные аппараты и группировки)
 - орбитальная и наземная обеспечивающая инфраструктура
- использование РОС для отладки всей отечественной системы ДЗЗ**

1. Быстрая и комплексная отработка новых средств ДЗЗ для масштабирования на АКА
2. Участие экипажа
3. Измерения комплексом интегрированных средств радиолокации, оптического наблюдения и радиометрии
4. Измерения с параметрами, которые недоступны для АКА

Возможности и задачи для исследований по направлению ДЗЗ с последующим масштабированием результатов на автоматических КА

частиц и их энергии отражаются на состоянии ионосферы, приводят к возникновению дополнительных электрических токов, вызывают вариации магнитного поля, полярные сияния и ряд других явлений. Из-за длительных ночных периодов, слабой электромагнитной радиации во время полярной ночи ионосфера в полярных областях более чувствительна к внешним корпускулярным воздействиям, и здесь могут быть зарегистрированы даже сравнительно слабые их изменения. Все эти особенности полярной ионосферы делают ее чрезвычайно удобным объектом для изучения связей между процессами, происходящими на Земле, на Солнце и в околоземном космическом пространстве.

Для РОС в целом актуальны две основные группы задач. Первая – продолжение и развитие традиционных для околоземного пилотируемого космоса направлений исследований. Вторая – это дополнительные и

новые научные исследования с учетом перехода на орбиту с высоким наклоном.

Безусловно, реализация потенциальных новых возможностей РОС для научных и прикладных задач требует разработки новых эффективных подходов к организации целевого использования станции. В том числе необходимо обеспечить своевременное, целевое и в достаточном объеме финансирование работ.

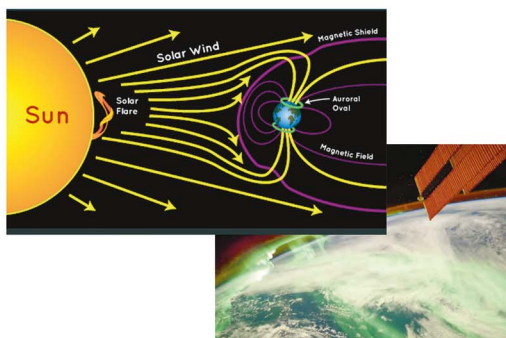
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научные исследования на пилотируемых космических комплексах играют сегодня важную роль в науке и технике в общемировом масштабе. Российский опыт, начиная с первых пилотируемых полетов, является уникальным и обеспечивает сегодня российским специалистам передовые возможности.

Солнечно-земные связи

Задачи исследований:

1. Систематическое картографирование авроральных эмиссий в полярной атмосфере
2. Изучение оптических атмосферных явлений естественного и техногенного происхождения
3. Исследование потоков микрочастиц на низких околоземных орбитах
4. Радиозондирование верхних слоёв ионосферы
5. Мониторинг плазменно-волновых процессов в окрестности станции
6. Исследования плазменно-волновых процессов у поверхности РОС



Для наклонения 96.8° возможен более широкий, приближенный к условиям «открытого космоса» диапазон исследований в части солнечно-земных связей, включая взаимодействие станции с потоками плазмы магнитосферы, галактическими и солнечными космическими лучами

Возможности РОС для исследований солнечно-земных связей

Международная космическая станция – действующая программа, великое достижение человечества и современности. Решение о продлении эксплуатации МКС до 2028 г. создаст основу для развития программ научных исследований уже сегодня. Эта работа проводится по линии ГК «Роскосмос» и Российской академии наук.

Проработка следующих шагов в области пилотируемого космоса на околоземных орбитах должна позволить

выполнить запланированные и вновь предлагаемые исследования, обеспечить непрерывность пилотируемых полетов, развитие накопленного опыта международного сотрудничества при реализации пилотируемых программ.

Развитие науки на пилотируемых комплексах также связано с решением задач исследования Луны автоматическими аппаратами и последующим переходом к пилотируемым экспедициям.

**ПОКУПАЙТЕ ДЕШЕВЛЕ
В ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИНЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВА «НАУКА»**



КНИГИ



ЖУРНАЛЫ



ИЗУЧЕНИЕ ЗЕМЛИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ «УРАГАН»



БЕЛЯЕВ Михаил Юрьевич,

*доктор технических наук, профессор,
научный руководитель экспериментов «Ураган», «Сценарий» и др.*

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва

DOI: 10.7868/50044394824020026

ОРБИТАЛЬНЫЕ СТАНЦИИ – ОТ «САЛЮТОВ» ДО МКС

20 ноября 2023 г. исполнилось 25 лет со дня запуска на орбиту функционального грузового блока «Заря» – первого элемента Международной космической станции (МКС), что стало началом реализации самого крупного и дорогого космического проекта в истории человечества¹. Первоначально США плани-

ровали создать свою национальную орбитальную станцию, но в те годы технически это им было не под силу, прежде всего из-за отсутствия транспортного корабля, способного длительное время находиться в составе станции – только наша страна обладала тогда такими возможностями. Несмотря на известные трудности, которые наша страна переживала в 1990-е гг., на орбите успешно работал орбитальный комплекс (ОК) «Мир»². Фактически наш отечествен-

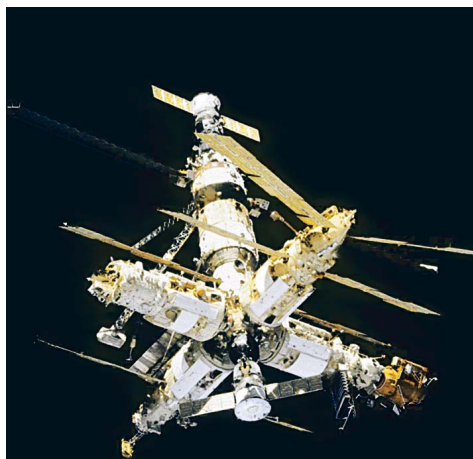
¹ Герасютин С.А., Левитан Е.П. «Заря» новой эры космических станций. График сборки МКС // Земля и Вселенная. 1999. № 2. С. 3–19; Мировая пилотируемая космонавтика / Под ред. Ю.М. Батурина. М.: РТСофт, 2005. С. 542–587; Левитан Е.П., Герасютин С.А. МКС вчера, сегодня, завтра (к 10-летию запуска первого модуля станции) // Земля и Вселенная. 2008. № 5. С. 46–51; Артемьев О.Г. Космос и МКС. Как все устроено на самом деле. М.: АСТ, 2020; Беляев М.Ю. От ракеты Р-7

и первого полета человека в космос до постоянной пилотируемой орбитальной станции // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29. № 3 (114). С. 96–121.

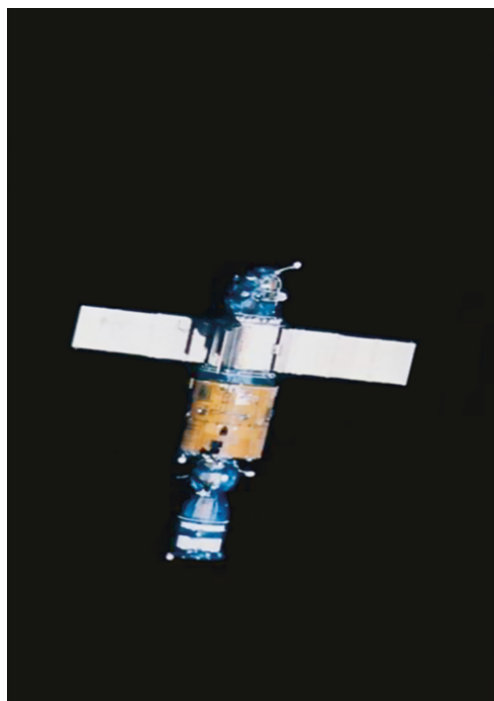
² Благов В.Д. «Мир» – советская орбитальная станция нового поколения // Земля и Вселенная. 1986. № 6. С. 2–10; Орбитальный комплекс «Мир». М.: Росавиакосмос, 2001; Железняков А.Б. Орбитальный комплекс «Мир». Триумф отечественной космонавтики. М.: Яуза – Эксмо, 2017.

ный ОК «Мир» уже тогда был международной станцией, на которой выполнялись многочисленные эксперименты, в том числе и по международным программам исследований. Только наша страна обладала технологиями создания и длительной эксплуатации орбитальных станций. Можно с уверенностью сказать, что благодаря отечественным орбитальным станциям и кораблям «Союз», выводимым на орбиту одной из модификаций легендарной «семерки», созданной под руководством С.П. Королёва, на орбите уже несколько десятилетий постоянно работают люди. Корабли США «Спейс Шаттл» могли находиться на орбите непродолжительное время – около двух недель³, а для существова-

³ Герасютин С.А. Программа «Спейс Шаттл» завершена // Земля и Вселенная. 2012. № 2. С. 20–35.



Орбитальный комплекс «Мир» в полной конфигурации, на котором 15 лет проводились эксперименты и исследования по отечественным и международным программам. 29 января 1998 г. Фото РКК «Энергия»



Орбитальные станции, на которых выполнялись эксперименты в различных направлениях исследований: «Салют-6» и «Салют-7». 27 августа 1978 г. и 18 сентября 1985 г. Фото РКК «Энергия»

ния постоянной пилотируемой станции необходимо, чтобы в ее составе всегда находился корабль-спасатель, способный в случае необходимости вернуть экипаж на Землю, то есть конкурентов у нашего «Союза» тогда не было⁴. Поэтому, несмотря на то что наши западные партнеры, и прежде всего США, получили во время совместных программ сотрудничества на ОК «Мир» достаточно много полезной информации по технологиям длительных пилотируемых полетов, МКС состоит из двух сегментов – российского и американского, включающего европейский и японский модули, а также канадский манипулятор.

С точки зрения основных целей программ научных исследований следует заметить, что они были различны для российской стороны и США с их партнерами, которые помимо политических задач рассматривали МКС в основном как платформу для выполнения медицинских экспериментов и исследований в области микрогравитации. Они активно проводились в период полета станций «Салют-6», «Салют-7» и ОК «Мир» (1977–2001 гг.)⁵. В то же время нашими отечественными учеными еще на предыдущих орбитальных станциях были получены выдающиеся результаты в области космической медицины, благодаря которым стало возможным осуществлять длительные полеты человека на орбите. Для отечественных ученых пилотируемые станции всегда создавались как многоцелевые орбитальные лаборато-

рии, позволяющие выполнять исследования и эксперименты во многих научных направлениях. Например, на ОК «Мир» были получены уникальные результаты в рентгеновской астрономии с помощью обсерватории «Рентген» на модуле «Квант». Для наблюдения астрономических источников и других объектов научная аппаратура, которая обычно жестко крепилась на корпусе станции, наводилась на исследуемые объекты путем разворотов и поддержания ориентации «Мира» с помощью гироскопов во время выполнения наблюдения. Это было непростой задачей (т.к. ОК «Мир» имел относительно большую и сложную конструкцию), которую удалось решить только с помощью созданного комплекса математических моделей, описывающих работу различных систем: управления ориентацией, энергоснабжения и т.д.⁶

На МКС российских ученых ждал сюрприз: оказалось, что разворачивать эту станцию для наведения научной аппаратуры на изучаемые объекты практически невозможно. Причина этого состоит в следующем. Исполнительными органами для управления ориентацией МКС служат двигатели ориентации российского сегмента и инерционные исполнительные органы – гироскопы, установленные на американском сегменте. Коллеги из США используют гироскопы с относительно малым для такой станции располагаемым кинетическим моментом 19 000 Нмс, в результате чего с их помощью можно только поддерживать ориентацию, при которой главные оси инерции станции совпадают с осями орбитальной системы координат и возмущающий гравитаци-

⁴ Шамсутдинов С.Х. Легендарный корабль «Союз» // Новости космонавтики. 2002. № 4 (231). С. 64–72; Бейкер Д. Космический корабль «Союз». М.: Бомбора, 2020.

⁵ Беляев М.Ю. Научные эксперименты на космических кораблях и орбитальных станциях. М.: Машиностроение, 1984; Семёнов Ю.П. Орбитальный пилотируемый комплекс «Мир» – основные итоги программы // Земля и Вселенная. 2001. № 5. С. 3–14.

⁶ Беляев М.Ю., Стажков В.М., Тесленко В.П. и др. Математическое обеспечение автоматизированного планирования исследований на орбитальном комплексе «Мир» // Космические исследования. 1988. Т. 27. Вып. 1. С. 126–134.

Установка гиродин на орбитальном комплексе «Мир» космонавтами А.Ю. Калери и А.С. Викторенко. Управление ориентацией ОК «Мир» с помощью гиродинов и созданного специального комплекса математических моделей позволило выполнить большое количество экспериментов и исследований.
Фото РКК «Энергия»

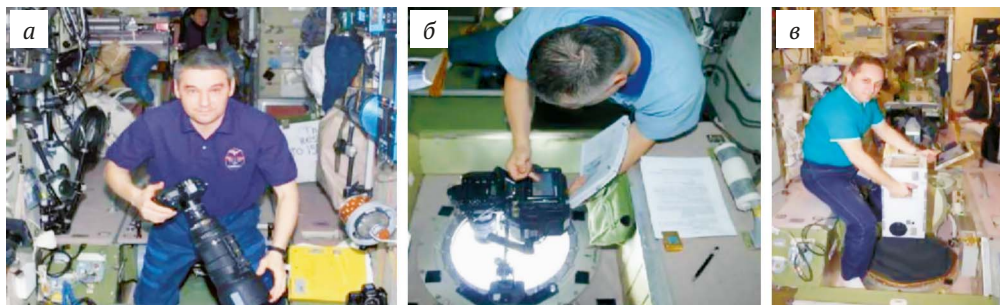


онный момент, действующий на МКС, равен нулю. Можно предположить, что такая ситуация возникла по двум причинам. Первая связана с упомянутым интересом наших партнеров в основном к исследованиям в области медицины и микрогравитации, для которых такая ориентация станции вполне достаточна. Вторая причина заключается в том, что для станций, имеющих большие размеры, гиродины оказываются неэффективными или даже неприемлемыми. На это обстоятельство обращал внимание еще в 1970-е гг. академик Б.В. Раушенбах, с которым мне, тогда молодому специалисту, написавшему диссертацию по небесной механике, довелось немного взаимодействовать, помогая ему принимать экзамены у студентов МФТИ. Дело в том, что масса какого-либо тела, например, гиродин, пропорциональна 3-й степени его радиуса, а момент инерции тела, влияющий на процесс управления ориентацией, пропорционален 5-ой степени радиуса. Поэтому гиродины не эффективны для управления ориентацией станций, имеющих большие размеры. Конечно, управление ориентацией МКС может выполняться с помощью двигателей российского сегмента, но практически это потребует чрезмер-

но больших затрат топлива. Основываясь на опыте управления при проведении экспериментов на ОК «Мир», я неоднократно поднимал этот вопрос, однако желание исправить ситуацию появилось только у специалистов фирмы «Боинг», которые были ответственны за создание американского сегмента. По ряду причин, прежде всего экономических, NASA не поддержало эту инициативу.

В начальный период полета МКС специалисты в основном занимались развертыванием этой станции и освоением ее эксплуатации, которая координировалась из двух центров управления – российского ЦУП-М в Королеве и американского ЦУП-Х в Хьюстоне. Для управления экспериментами в США, как это принято во всем мире при выполнении космических проектов, дополнительно используется еще один центр, расположенный в г. Хантсвилл (штат Алабама).

Эффективность исследований начального периода полета МКС могла быть резко повышена в случае использования в качестве начального элемента этой международной станции ОК «Мир», функционирующего на такой же орбите. Это очевидно выгодное решение не было принято США по политическим



Съемка исследуемых объектов в космическом эксперименте «Ураган»: а – космонавт В.Г. Корзун с фотоаппаратурой, б – космонавт Ф.Н. Юрчихин с фотоспектральной системой, в – космонавт А.Н. Шкаплеров с видеоспектральной системой. Фото РКК «Энергия»

соображениям, несмотря на то, что на ОК «Мир» было размещено большое количество научной аппаратуры, в том числе около 5 т зарубежной аппаратуры, включающей рентгеновские телескопы, оптический сканер MOMS и др. Более того, существовала техническая возможность доставки части научной аппаратуры с ОК «Мир» на МКС с помощью кораблей «Спейс Шаттл», которые могли стыковаться как с ОК «Мир», так и с МКС. Однако, начальная орбита МКС была по инициативе NASA и тем же причинам выбрана таким образом, что возможность использования научной аппаратуры ОК «Мир» на МКС практически исключалась.

Начало полета МКС я встретил, работая заместителем руководителя полетом по вопросам планирования, автоматизации и математического моделирования, а также проведения экспериментов и исследований, причем это последнее направление было мне особенно близко, поскольку им я активно занимался и еще в 1980-е гг. опубликовал по этим вопросам книгу и защитил докторскую диссертацию. Однако, поскольку в начале полета МКС экспериментов практически не было, то и управлять было нечем. Многие способные специалисты в те годы меняли профессию. Мне тоже по-

ступали заманчивые предложения, но бросать родное предприятие не хотелось. Вспомнилось, что когда-то премьер-министр Англии Бенджамин Дизраэли, который был еще и писателем, сказал: «Когда я хочу прочесть интересную книгу, я сажусь и пишу ее». Я стал сам придумывать и организовывать эксперименты на МКС. Это было не просто, поскольку помимо технических проблем, одна из которых связана с возможностями ориентации этой станции, при организации и проведении экспериментов на МКС приходилось сталкиваться и с другими, в том числе с экономическими. Даже и при наличии финансирования во время создания МКС и в начале ее эксплуатации найти изготовителя научной аппаратуры было крайне сложно. Все-таки, что-то получилось сделать – всего на МКС мне удалось придумать и поставить 10 экспериментов, одним из которых стал эксперимент «Ураган».

ЭКСПЕРИМЕНТ «УРАГАН» НА МКС

Одно из основных направлений использования космической техники связано с наблюдением и изучением Земли. Для нашей страны, имею-

щей обширную территорию, это направление является особенно востребованным и привлекательным. Понятно, что непрерывное наблюдение земной поверхности должно осуществляться с помощью автоматических космических аппаратов. Однако создание автоматических космических систем, осуществляющих непрерывный мониторинг земной поверхности и обработку поступающей информации, предполагает предварительную отработку используемых методов и средств наблюдения. Такую отработку наиболее удобно проводить на пилотируемой орбитальной станции, являющейся научной космической лабораторией. Причем отработанные технические средства, методы и дорогостоящий наземный сегмент могут быть использованы затем при создании автоматических систем наблюдения Земли. С этой целью на российском сегменте МКС одним из первых был организован космический эксперимент (КЭ) «Ураган», целью которого и является отработка технических средств и методов наблюдения Земли с борта российского сегмента (РС) МКС. Наибольшее внимание в нем уделяется наблюдению потенциально опасных и катастрофических явлений, возникающих на Земле. Изучение различных объектов и явлений на поверхности Земли и в ее атмосфере выполняется приборами, работающими в различных областях спектра электромагнитного излучения. В этом эксперименте создается и используется научная аппаратура, способная работать в различных спектральных диапазонах. Это позволяет комплексно исследовать изучаемые в эксперименте объекты и явления. Выявление какого-либо фактора в изучаемом явлении или процессе одним из используемых в КЭ «Ураган» прибором может сигнализировать о прибли-



Конфигурация Международной космической станции в начальной стадии строительства: российские модули «Заря» и «Звезда» с американским модулем Unity. 2000 г. Фото NASA

жении важного, порой даже катастрофического события на Земле и целесообразности применения для его изучения других приборов, входящих в состав эксперимента.

Размещение многоприборного комплекса научной аппаратуры в составе орбитальной станции является не простой задачей⁷. Для МКС эта задача усложнилась вследствие ряда причин, одна из которых заключается в том, что направление главных осей инерции МКС постоянно менялось в процессе разворачивания станции, и установить съемочную систему на корпусе МКС в надира на длительный интервал времени было невозможно. Поэтому на

⁷ Уткин В.Ф. Международная космическая станция и программа научно-прикладных исследований // Земля и Вселенная. 1995. № 4. С. 3–9; Лопота В.А. Научные эксперименты на МКС (к 10-летию запуска первого модуля) // Земля и Вселенная. 2008. № 6. С. 3–10.

начальном этапе выполнения экспериментов по программе «Ураган» на МКС для наведения на исследуемые объекты использовались «ручные» приборы: фотоаппараты и спектрометры. Отметим, что в те годы это был единственный собственный источник получения снимков высокого разрешения в нашей стране.

ЧЕЛОВЕК ИЛИ АВТОМАТ, ЧТО ЛУЧШЕ?

Для съемок Земли ранее обычно использовалась специально разработанная аппаратура, например, многозональная фотокамера МКФ-6М массой 240 кг, жестко закрепленная на борту орбитальной станции «Салют-6». Съемки обычными серийными видео- и фотокамерами, которые космонавты проводили «с рук» через иллюминаторы, считались вспомогательными, репортажными или даже художественными съемками (например, восход и закат Солнца), поскольку разрешение и возможности серийных пленочных фотоаппаратов были недостаточны для детальных съемок земной поверхности с борта орбитальных станций. В связи с бурным развитием цифровой фотоаппаратуры, которая на рубеже XXI в. быстро догнала пленочные фотоаппараты, а затем и намного опередила их по всем характеристикам, эта ситуация изменилась. При этом значительно упростился и сам процесс съемки. Например, если раньше нужно было постоянно перезаряжать кассеты, вмещающие обычно лишь 36 кадров, то теперь без выполнения дополнительных действий можно получать ежедневно сотни и тысячи снимков с недостижимыми ранее выдержками и светосилой. Разрешение цветных снимков Земли, выполненных с борта МКС в надир (высота орбиты около 400 км) серийным

фотоаппаратом с серийным объективом и фокусным расстоянием 1600 мм, обеспечиваемым использованием конвертора, уже достигло 2 м/пиксель, что соответствует уровню лучших современных спутников дистанционного зондирования Земли. Поэтому съемка Земли с борта МКС через иллюминаторы превратилась в ценный источник информации, дополняющий съемки, постоянно проводящиеся спутниками дистанционного зондирования.

Помимо съемок цифровой фотоаппаратурой, установленной перед иллюминаторами на специальные кронштейны и поворотные платформы, используется и режим съемки камерой, находящейся непосредственно в руках космонавта. В этом случае «поворотной платформой» являются руки космонавта, легко и ловко поворачивающие массивный фотоаппарат с объективом, «висящий» в невесомости как в некоем идеальном карданном подвесе. Системой управления в этом случае служит человеческий интеллект, позволяющий и сегодня гораздо надежнее любого искусственного интеллекта обнаружить такие заранее неизвестные объекты и явления, как внезапный пожар в тайге или загрязнение акватории.

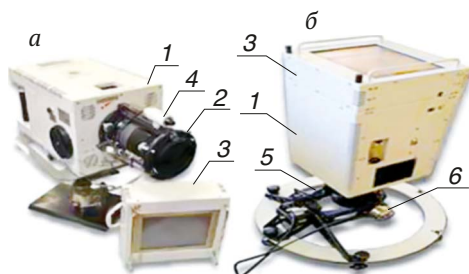
Фотоспектральная система (вид спереди и вид сзади), используемая в эксперименте «Ураган» с возможностью регистрации отраженного от подстилающей поверхности излучения в диапазоне 350–1050 нм. Фото РКК «Энергия»



Итак, современная пилотируемая космонавтика предоставляет в распоряжение исследователя цифровую фотоаппаратуру, позволяющую выполнять детальные (до 2 м/пиксель при съемке в надир) снимки земной поверхности и тренированного оператора, который ежедневно совершенствует свои навыки съемки Земли в процессе многомесячной экспедиции.

Фотосъемка земной поверхности на РК МКС осуществлялась с помощью переносных цифровых фотокамер Nikon D3, Nikon D3S, Nikon D4, Nikon D3X, Nikon D800, Nikon D850. Сейчас съемка ведется камерами Nikon D5. Фотокамеры регистрируют объекты земной поверхности в оптическом диапазоне спектра электромагнитных волн, в натуральных цветах. Кроме цифровых фотокамер в КЭ «Ураган» используют фото- и видеоспектральную систему (ФСС и ВСС) с возможностью регистрации спектральной плотности энергетической яркости излучения, отраженного от подстилающей поверхности. Эти приборы изготовлены для КЭ «Ураган» по техническому заданию РКК «Энергия» в Институте прикладных физических проблем им. А.Н. Савченко Белорусского государственного университета под руководством Б.И. Беляева.

При обработке информации, получаемой спектрометрической аппаратурой, требуется учитывать влияние атмосферы на измерения, иначе получаемые результаты измерений будет трудно, или даже практически невозможно интерпретировать. Поэтому для обработки результатов экспериментов была разработана методика атмосферной коррекции спектров и изображений в видимой и ближней инфракрасной области спектра, получаемых в процессе съемки земной поверхности с борта МКС указанными съемочными системами в рамках КЭ «Ураган». В основе методики лежит использование анали-



Видеоспектральная система: а – на юстировочном столе, б – на кронштейне установочном. Система используется в КЭ «Ураган», «Сценарий» и других экспериментах для наблюдения изучаемых объектов космонавтами «с рук» и в автоматическом режиме. Фото РКК «Энергия»

тической аппроксимации для спектров излучения на верхней границе атмосферы, погрешность которой для безоблачной атмосферы составляет 2–5%, что позволяет быстро и с высокой точностью восстанавливать спектры альbedo подстилающей поверхности.

Радиометрическая коррекция (энергетическая калибровка) и атмосферная коррекция RGB-изображений ФСС выполняется путем пространственной «привязки» пикселей и их значений к соответствующим областям спектрометрирования и значениям спектров. Для этой цели была разработана корреляционная методика их уточненной пространственной «привязки». В результате последующей атмосферной коррекции изображений ФСС получены средние значения альbedo по каждому из R, G, B каналов, что, в свою очередь, важно для тематической обработки изображений с использованием квазисинхронных наземных измерений или спектров различных объектов из спектральных баз данных. С помощью спектрометров ФСС, ВСС получено большое количество интересных данных, их использование продолжается не только в КЭ «Ураган», но и в других экспе-

риментах на МКС: «Дубрава», «Сценарий» и др.

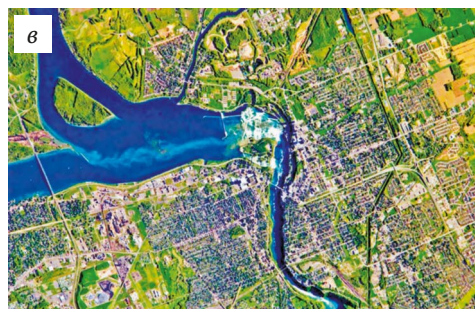
Несомненным преимуществом ручных спектрометрических приборов, используемых на борту российского сегмента МКС, является возможность отслеживания объекта исследования. За счет этого появляется возможность изучать изменение спектральных характеристик подстилающей поверхности в зависимости от угла визирования. В отличие от автоматических аппаратов, на МКС при выполнении съемок используются интеллектуальные возможности космонавтов и специально разработанное Д.Ю. Караваевым математическое обеспечение для поддержки КЭ на борту станции (популярная у космонавтов и ученых система «Сигма»), которое позволяет космонавтам самим планировать и проводить съемки в личное время и выходные дни.

В ходе реализации КЭ «Ураган» накоплен значительный банк данных по

результатам исследований с РС МКС. Космические снимки и спектрометрическая информация, полученные при реализации эксперимента на его борту, широко используются различными организациями в научных целях и в прикладной сфере деятельности. Данные КЭ «Ураган» применяются также в системах семейства «Вега-Созвездие» ИКИ РАН. Полученные в эксперименте «Ураган» данные использовались при изучении ледников, наводнений, вулканов, пожаров и других опасных явлений. Неоценимый вклад в изучение потенциально опасных и катастрофических явлений по снимкам КЭ «Ураган» был внесен сотрудниками Института географии РАН (ИГ РАН) и, прежде всего, руководителем работ в ИГ РАН по изучению Земли с МКС, кандидатом географических наук Л.В. Десиновым (1941–2021). Среди полученных в КЭ «Ураган» результатов важное значение имеет, например, исследова-



Примеры снимков эксперимента «Ураган»:
а – вулкан Сарычева на острове Матуа в Курильской гряде, б – вулкан в Новой Гвинее – пример активного извержения, растекания лавы и ее вторжения в лесные массивы, в – Ниагарский водопад в Северной Америке. Фото РКК «Энергия».



ние, изложенное в докладе почетного Президента Российского географического общества, академика В.М. Котлякова, 25 июля 2012 г. в г. Геленджике Президенту РФ по поводу катастрофического наводнения в Краснодарском крае в районе г. Крымск, в результате которого пострадали более 34 тысяч человек и погиб 171 человек. В основе данного исследования были использованы данные, полученные в эксперименте. Проведенные исследования позволили объяснить причину возникновения произошедшей катастрофы и дать предложения по недопущению подобных катастрофических явлений. Доклад был заслушан также на Президиуме РАН. В обоих случаях доклад получил высокую оценку.

Разработанные технологии позволяют выполнять наблюдения ледников, определять их подвижки и моменты катастрофического схода, оценивать развитие лесных пожаров, идентифицировать источники океанских кольцевых волн и т.д. В разработке математических моделей для оценки развития потенциально опасных и катастрофических явлений большое участие принимали ученые Института прикладной механики РАН, в том числе один из первых ученых института, начавших сотрудничество по этому эксперименту, доктор физико-математических наук С.Я. Секерж-Зенькович.

Материалы космической съемки были использованы для исследования причин катастрофического схода ледника Колка в горах Центрального Кавказа в 2002 г., приведшего к многочисленным жертвам, в том числе гибели съемочной группы С. Бодрова. Результаты этих исследований отмечены в серии публикаций. Замечу, что снимки ледника Колка были сделаны на МКС еще 13 августа, за 38 дней до его катастрофического схода. Однако у нас тогда были трудности по сбросу со стан-

ции объемной научной информации. Для оперативной передачи служебных данных по соглашению с американскими коллегами мы использовали канал NASA OCA, который иногда позволял нам получить через геостационарный спутник связи TDRS оперативно важную информацию по КЭ «Ураган». 11 сентября 2001 г. нам с самым известным и опытным заместителем руководителя полетами В.Д. Благовым (1936–2019) позвонили коллеги из Хьюстона и сказали о произошедшем у них теракте и возможной передаче всего управления МКС российской стороне. Посмотрев трассу МКС, мы увидели, что станция будет пролетать как раз над Нью-Йорком, где произошел теракт и попросили наш экипаж выполнить съемку, которая через канал OCA оперативно попала к нам. После этой истории все наши снимки, выполненные по программе КЭ «Ураган» и помещенные в бортовой компьютер для отправки по американскому каналу OCA, попадали не в ЦУП-М, а отправлялись в Вашингтон, где их анализировали «ученые-землеведы в штатском» и нам ничего не передавалось. Так мы лишились оперативного получения снимков. Надо сказать, что у нас были прекрасные отношения с коллегами в Хьюстоне и Хантсвилле. По моей просьбе они пытались решить эту проблему. Совет был получен такой: «Сделайте свой самый простой канал и перестаньте пытаться использовать для передачи снимков OCA. Вам тогда опять предложат его использовать». Так и поступили. Талантливый начальник сектора РКК «Энергия», кандидат технических наук Д.Ю. Караваев быстро разработал оригинальную систему обмена данными между МКС и ЦУП-М. Отправить ее на борт МКС, однако, быстро не удалось... Поэтому снимки ледника мы получили только после произошедшей катастрофы. Некоторые специалисты,

и прежде всего Л.В. Десинов, считали, что по снимку, на котором были видны пять дугообразных волн активизации – предвестники катастрофы, можно было предвидеть эту опасность. Информации и документов по этому событию довольно много, и его анализ заслуживает отдельной публикации.

Как и полагали наши американские друзья, после отправки разработанной Д.Ю. Караваевым системы на борт МКС, американские коллеги вновь открыли нам возможности использования канала ОСА. Но теперь в этом не было большой необходимости, тем более что наши специалисты сделали для передачи научных данных по экспериментам российскую систему передачи информации и затем внедрили еще и широкополосную систему связи через отечественные спутники-ретрансляторы.

На сегодняшний день изучаются особенности восстановления ледника Колка, набравшего по данным исследований за 20-летний период около 19% объемов тела. С 2008 г. в рамках КЭ «Ураган» ведется мониторинг Волго-Ахтубинской поймы и дельты Волги для оценки динамики засыхания, рисков возникновения пожаров, изменения конфигурации русла Волги и Ахтубы. Постоянно проводится мониторинг протоков канала Бахтемир для оценки возможности судоходства и мониторинг загрязнения Волги и Каспия продуктами нефтепереработки. Осуществляется мониторинг Каспийского моря на предмет оценки явлений, приводящих к гибели биоты (массовые заморы рыбы, явления массовой гибели каспийской нерпы). На протяжении всего срока проведения эксперимента проводится мониторинг пульсации ледника Медвежий на Памире. Изучаются пульсации ледников Центрального Памира. Выявлены и проанализированы подвижки 48 ледников в 6 речных бассейнах. В 2020 г. учеными ИГ РАН опубли-

кованы результаты многолетнего мониторинга горных ледников Северного и Южного полей Патагонии. Показана многолетняя динамика и установлено феноменальное наступление ледников на фоне глобального сокращения оледенения самого большого глетчера Южной Америки Брюгген. С 2019 г. ведется наблюдение за оползневым процессом на реке Дюльтычай в Рутульском районе Республики Дагестан и сформировавшимся запрудным озером как потенциально опасным природным объектом. Весьма важно, что в рамках КЭ «Ураган» и «Сценарий» налажено взаимодействие с МЧС РФ. Получено благодарственное письмо от МЧС РФ за качественный прогноз о крупном катастрофическом событии на озере Байкал, что позволило своевременно принять необходимые решения и избежать негативных последствий. Результаты КЭ используются также в курсах лекций «Экспериментальные исследования и комплексные испытания», «Использование космических технологий в народном хозяйстве», «Методы и алгоритмы обработки сигналов и изображений» и др. в Мытищинском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В настоящее время проведение КЭ «Ураган» выполняется с применением не только переносной, но и стационарной аппаратуры с широким полем зрения, а также с использованием подвижных платформ для наведения приборов на исследуемые объекты.

ПЛАТФОРМЫ НАВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ АППАРАТУРЫ НА ИЗУЧАЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ

Использование возможностей космонавтов при выполнении научных наблюдений дает определенные преимущества в процессе проведения исслед-

Подвижные платформы наведения: слева – «СОВА-1», справа – «СОВА-2». Они позволяют наводить исследовательскую аппаратуру на изучаемые объекты операторами, находящимися на борту МКС или на Земле, а также в автоматическом режиме по оптимальным программам наведения. Фото РКК «Энергия»



дований. К сожалению, постоянно нести такую «научную вахту» космонавты не могут, т.к. большую часть суток они должны заниматься другой работой, а ночью отдыхать.

Для снижения загрузки экипажа в настоящее время на станции установлены специальные подвижные платформы наведения (ППН), которые уже используются на борту РС МКС для обеспечения установки на иллюминаторах служебного модуля «Звезда» и многоцелевого лабораторного модуля «Наука» различной научной аппаратуры видео-, фото- и спектральной съемки, наведения научной аппаратуры и съемки по заданной программе оператором или без участия оператора.

Система «СОВА» представляет собой платформу наведения, устанавливаемую на иллюминатор, на которой фиксируется съемочная аппаратура. Управляющий ноутбук расположен на расстоянии 1.5–3 м от иллюминатора. Система «СОВА» позволяет обеспечивать наведение полей зрения научной аппаратуры и отслеживание объекта по изображению на экране монитора ноутбука. На РС МКС предусмотрено несколько модификаций аппаратуры «СОВА» для установки ее на иллюминаторы МКС разного диаметра и имеющих некоторые конструктивные отличия.

В ходе проектирования были приняты два варианта конструктивного

построения ППН «СОВА». Вариант «СОВА-1» выполнен по несколько необычной схеме – съемочная аппаратура закрепляется на платформе неподвижно, а сканирование поверхности Земли осуществляется при помощи зеркала, установленного на подвесе, поворачиваемом при помощи электроприводов. Вариант «СОВА-2» построен по «классической» схеме на основе ранее разработанных систем наведения с ручным управлением. В качестве электроприводов, обеспечивающих поворот установленной аппаратуры, использованы линейные актуаторы (линейные приводы). Скорость углового перемещения оптической оси платформ наведения «СОВА-1» и «СОВА-2» составляет 0.75–1.5 град./с и 0.5–6.0 град./с соответственно.

Использование ППН позволяет значительно расширить возможности МКС по исследованию Земли и небесной сферы. Для выполнения наблюдений заданных объектов в этом случае могут использоваться методы оптимального планирования программы научных экспериментов. При использовании методов оптимизации программы экспериментов обеспечивается получение максимального объема полезной научной информации при соблюдении заданных ограничений на планирование.

Первый экземпляр аппаратуры СОВА-1 был доставлен на борт РС МКС в 2019 г. и успешно используется для выполнения экспериментов. При этом обеспечивается построение оптимальных программ наблюдения исследуемых объектов, что впервые в мире реализовано на борту космического

аппарата. В 2023 г. на борт МКС доставлены два дополнительных комплекта аппаратуры «СОВА-2». Их совместное использование на РС МКС позволяет существенно расширить возможности выполнения наблюдений различных объектов, так как в этом случае научные измерения проводятся одновременно несколькими приборами. Для оптимизации программы наблюдений заданных объектов несколькими комплектами аппаратуры разработаны специальные методы оптимизации управления ППН⁸. Если ранее при использовании одной ППН «СОВА» решалась задача, известная в теории управления как «задача о коммивояжере», то теперь решается «задача нескольких коммивояжеров».

Реализуется также возможность наведения исследовательской аппаратуры, установленной на ППН, наземным оператором в телеоператорном режиме с помощью широкополосного спутникового канала связи.

БУДУЩЕЕ ВОЗМОЖНОСТИ «УРАГАНА»

В настоящее время в рамках КЭ «Ураган» с целью дальнейшего развития системы мониторинга Земли создана и готовится к отправке на борт РС МКС в 2024 г. научная аппаратура «Гиперспектрометр». Данная аппаратура изготовлена МФТИ и АО «НПО «Лептон», руководитель работ в МФТИ – С.С. Негодяев, а в «НПО Лептон» – О.Ю. Казанцев. Обработка результатов съемки НА «Гиперспектрометр» будет осуществляться на борту с участием космонавта. Это

⁸ Беляев М.Ю., Боровихин П.А., Есаков А.М., Караваев Д.Ю., Рассказов И.В. Оптимизация наведения научной аппаратуры на наблюдаемые объекты в эксперименте «Ураган» на МКС // Гироскопия и навигация. 2023. Т. 31. № 4 (123). С. 118–137.

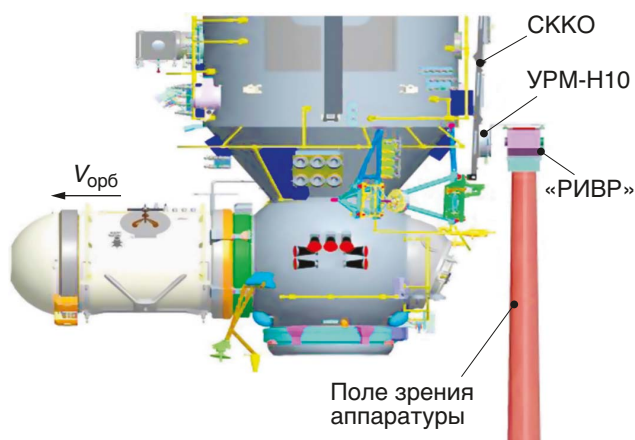


*Аппаратура «Гиперспектрометр»
на иллюминаторе № 9 российского
сегмента МКС. Фото РКК «Энергия»*

позволит повысить оперативность анализа полученных данных, повысит качество планирования наблюдений и сократит потоки оперативно передаваемых данных на Землю.

Аппаратура предназначена для регистрации и обработки гиперспектральных изображений земной поверхности в нескольких спектральных каналах (по выбору космонавта от 1 до 100 из 180 каналов) в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра, а также получения панхроматических изображений для визуализации заданной области земной поверхности. С помощью аппаратуры «Гиперспектрометр» планируется решение следующих задач: оценка состояния лесных угодий и сельскохозяйственных посевов; обнаружение загрязнения растительности и воды нефтью, мазутом и т.д., а также определение нанесенного этими факторами ущерба; построение карт концентрации хлорофилла в приповерхностных водах; обнаружение участков наркотических растений среди дру-

Размещение инфракрасного радиометра высокого разрешения (РИВР) на российском многофункциональном лабораторном модуле «Наука» МКС. Фото РКК «Энергия»



гой растительности и т.д. Для выполнения мониторинга Земли в среднем и дальнем ИК-диапазонах в КЭ «Ураган» создается научная аппаратура инфракрасного радиометра высокого разрешения (РИВР): число информационных каналов – два; границы спектральных диапазонов информационных каналов 0,5–3,5–4,1 и 8,0–10,0 мкм; пространственное разрешение с номинальной орбиты МКС (400 км) – 30 м; полоса обзора для орбиты высотой 400 км – 70 км. Эта аппаратура изготавливается на предприятии «Российские космические системы» (РКС) под руководством главного конструктора направления дистанционного зондирования Земли в РКС Ю.М. Гектина и с учетом высоты орбиты МКС позволит получать информацию мирового уровня.

Радиометр РИВР планируется установить на многофункциональном лабораторном модуле «Наука» МКС. Интеграция прибора с РС МКС обеспечит все необходимые условия для работы радиометра РИВР в рамках космического эксперимента «Ураган», что открывает новые возможности для участников эксперимента. Использование в КЭ «Ураган» радиометра РИВР позволит обеспечить получение трассовых изображений в инфракрасном диапазоне для решения широкого круга задач: мониторинг и прогноз техногенных и природных чрезвычайных ситуаций; обнаружение очагов лесных

и подземных пожаров, определение влажности почвы и уровня грунтовых вод; поиск подземных вод и геотермических источников; исследование вулканической и сейсмической активности; обнаружение источников тепловых потерь и т.д. Данная информация будет востребована Федеральной службой охраны леса, МЧС, экологическими и природоохранными службами, службами геологоразведки, а также региональными, отраслевыми и частными организациями.

Эксперименты на РС МКС позволят также осуществить техническую отработку опытного образца инфракрасного радиометра высокого разрешения в реальных условиях эксплуатации для дальнейшего его использования в различных автоматических информационных комплексах дистанционного зондирования Земли.

КОНТРОЛЬ С РС МКС ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЖИВОТНЫХ И ПТИЦ

Примером комплексного применения различной научной аппаратуры КЭ «Ураган» может служить использование данных от научной аппаратуры «Икарус», разработанной по Согла-



Дратхаар Рэй готов к проведению эксперимента. Фото автора

шению между Роскосмосом и Немецким центром авиации и космонавтики (DLR) и входящей в КЭ «Ураган». С помощью аппаратуры «Икарус» в КЭ «Ураган» можно отслеживать перемещения животных и птиц на земной поверхности. С этой целью на исследуемых объектах размещаются миниатюрные (массой 5 г) датчики (теги), в состав которых входят приемники спутниковой навигационной системы, вычислительное устройство, аккумулятор, солнечная батарея, приемопередатчик, акселерометр, магнитометр, датчики температуры и влажности.

Окружающий нас животный мир чрезвычайно многообразен и интересен. Миллиарды животных постоянно мигрируют по земному шару и сведения о миграциях животных могут дать важную информацию о нашей планете. Данные об их миграции содержат ценнейшую информацию для оценки экологической, эпидемиологической и иных ситуаций на планете. Занимаясь с юношеских лет охотой и изучая повадки животных, я размышлял о механизмах их ориентации в пространстве, например, при перелетах птиц над морями и океанами. Как птицы понимают, куда и зачем им надо лететь? Задача ориентации и навигации космических кораблей, например, была успешно решена, но для этого потребовалась напряженная работа многих выдающихся ученых и целых институтов, а вылупившийся из яйца птенец немного подрастет и знает, куда, как и зачем надо ему лететь. Занимаясь управлением в космонавтике, я нередко обсуждал эти вопросы с коллегами.

В 2009 г. по инициативе немецкого института поведения животных Общества Макса Планка (MPIAB) в рамках программы международного сотрудничества ICARUS под руководством профессора Мартина Викельски, энтузиаста и одного из мировых лидеров



Автор (слева) с легендарным заместителем руководителей полетов орбитальных станций «Салют», «Мир» и МКС В.Д. Благовым и дратхааром Лордом на охоте в поле около охотничьей избушки в Ярославской области

направления изучения миграций животных, были начаты работы по разработке системы слежения за мелкими животными. Я написал Мартину письмо, в котором предложил отработать такую технологию и систему на российском сегменте МКС в рамках эксперимента «Ураган». Это предложение основывалось на совпадении задач, решаемых в рамках обоих направлений исследований, а также на имеющихся возможностях отработки новых технологий и новой научной аппаратуры на российских орбитальных станциях.

Руководство DLR первоначально без особого энтузиазма отнеслось к этой идее, что было связано, видимо, с непростыми отношениями между Обществом Макса Планка и DLR. Первые годы полета МКС на российском сегменте станции нами проводились совместные с европейцами эксперименты, в которых мне довелось быть техническим руководителем с российской стороны. Работа по этим программам способствовала знакомству со многими руководителями из космических агентств наших партнеров, в частности с тогдашним руководителем DLR профессором Иоганном-Дитрихом Вёрнером. На конгрессе МАФ в Пекине в 2013 г. мы с ним не пошли на пленарные заседания, а обсуждали ряд возможных совместных проектов на РС МКС, в том числе и проект с научной аппаратурой «Икарус». После этого началась работа по подготовке Соглашения между агентствами обеих стран, которое было подписано в ноябре 2014 г. В соответствии с подписанным соглашением была создана, доставлена на борт РС МКС и развернута на станции аппаратура «Икарус».

Известно, что воздействие людей на природу отражается в поведении животных. Причина этого в том, что все виды животных занимают особые ниши, в которых они сохраняют свое

безопасное существование. Если виды животных теряют из-за деятельности людей часть или все свои ниши, они сокращаются или вымирают, или, например, они меняют свое поведение и ищут новую среду обитания. Следовательно, животные важны как датчики и ранние индикаторы, и на них влияют как положительные, так и отрицательные воздействия, вызванные человеческой деятельностью. Животные необходимы для нашего существования как источник пищи, но с другой стороны, они играют все более значительную роль в качестве переносчиков болезней и возбудителей эпидемий. Около 70% мировых эпидемий болезней, будь то атипичная пневмония, вирус Западного Нила или птичий грипп, представляют собой инфекционные заболевания, вызванные взаимодействием между дикими животными, сельскохозяйственными животными и людьми.

Чтобы активно участвовать в изучении и решении указанных проблем, необходимо найти ответ на фундаментальные вопросы: где находится животное в любой момент своей жизни? Каково внутреннее состояние животного? Какую поведенческую активность выполняет животное в настоящее время? Что приводит к смерти животного? Ни на один из этих вопросов нельзя было ответить в отношении свободно живущих животных, особенно когда речь шла о мелких животных, которые имеют наибольшее значение для нас, людей, например, как распространители болезней (прежде всего, это летучие мыши). Используемые в настоящее время технологии глобального контроля и слежения за животными через спутник исключают по-прежнему около 75% птиц и млекопитающих вследствие их малых размеров. Многие экологически и экономически важные виды животных очень мелкие, например летучие мыши, певчие птицы и пе-



Директор Института географии РАН, член-корреспондент РАН О.Н. Соломина в кресле (справа) в главном зале ЦУП-М за пультом управления при разворачивании антенн аппаратуры «Икарус» на МКС. Слева стоят автор и сотрудник ИГРАН Г.М. Тертицкий.
Фото РКК «Энергия»

релетная саранча. Общее правило при изучении миграций животных заключается в том, что устройства, прикрепленные к животным, не должны иметь массу более 3% от массы тела животного, чтобы дополнительный вес не влиял на его естественное поведение. И сегодня весьма важной задачей является создание системы глобального контроля перемещения мелких животных, которая открывает новую эру в этих исследованиях.

МКС является удобной лабораторией для создания и отработки систем отслеживания миграций животных. Для использования миниатюрных приемопередающих устройств на земной поверхности необходимо иметь на орбите низколетящий космический аппарат с большими антеннами. Полет МКС происходит на высоте около 400 км, в то время как искусственные спутники Земли имеют обычно большую высоту орбиты. Это обусловлено тем, что орбита МКС периодически корректируется для поддержания высоты орбиты, а топливо для коррекции орбиты МКС доставляется с помощью транспортных грузовых кораблей «Прогресс». Кроме того, наличие экипажа на борту МКС позволяет монтировать на ее внешней поверхности конструкции и антенны больших размеров, что также позво-

ляет уменьшить размеры приемопередатчиков на Земле. Важно также, что российскими специалистами была разработана уникальная технология проведения экспериментов на орбитальных станциях и накоплен значительный опыт их успешного проведения.

Аппаратура «Икарус» представляет собой систему, состоящую из бортового и наземного сегментов. В бортовую часть входит управляющий компьютер ОВС-I (OnBoard computer Icarus) и антенный блок, обеспечивающий выдачу управляющих данных закрепляемым на животных датчикам (тегам), а также сбор данных с тегов о координатах перемещения животных при их сезонной миграции. Функционирование бортового сегмента «Икарус» обеспечивалось с помощью получаемых данных и систем российского сегмента МКС, от которых ОВС «Икаруса» получал точное время, информацию об орбите МКС и ее ориентации и т.п. В соответствии с подписанным Соглашением за антенный блок и управляющий компьютер отвечал DLR. Следует отметить, что успеху данного проекта способствовало плодотворное сотрудничество немецких и российских специалистов. Например, российские специалисты, используя свой большой опыт разработки и проектирования бортовых ан-

тени, предложили эффективную окончателъную схему и конструкцию бортовых антенн оборудования «Икарус», которая была реализована на РС МКС. К созданию и производству управляющего компьютера ОВС-I была подключена фирма «Элкус» (г. Санкт-Петербург). Программное обеспечение для ОВС-I разрабатывала фирма STI (Германия). Наземный сегмент аппаратуры «Икарус» включает в себя множество тегов (массой до 5 г), которые на Земле крепятся на мигрирующих животных, а также специальные комплексы управления и обработки данных. Тег получает от РС МКС данные об орбите и ори-

ентации станции и способен рассчитывать данные о возможных сеансах связи с МКС. В расчетный момент времени тег с помощью спутниковой навигационной системы определяет свое местоположение и передает эту информацию на РС МКС вместе с данными от датчиков ускорений, температуры, магнитометра, входящих в состав тега. Принятая на станции информация передается в московский центр управления ЦУП-М, где она предварительно анализируется и затем выдается участникам исследований. Основные технические характеристики аппаратуры «Икарус» и передатчика представлены в таблицах.

Таблица 1

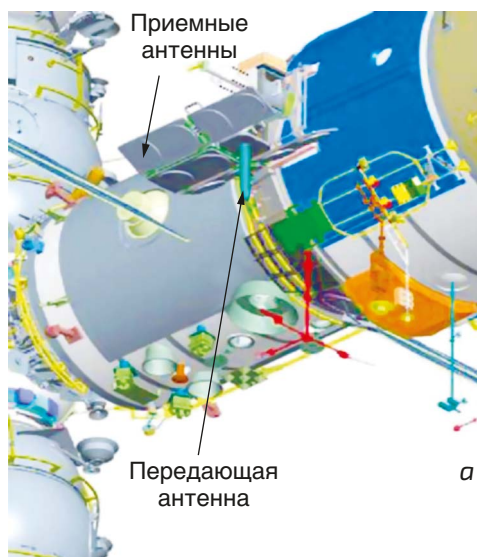
Основные технические характеристики аппаратуры «Икарус»

Восходящая линия связи (прием данных)	
Частота, МГц	401.5–403
Ширина полосы, МГц	1.2
Скорость передачи данных, бит/с	520
Мгновенная область покрытия поверхности Земли	90 × 800 км
Количество передатчиков, находящихся в поле зрения антенн, шт.	500
Нисходящая линия связи (передача)	
Частота, МГц	468.075–468.125
Ширина полосы, кГц	50
Скорость передачи данных, бит/с	656

Таблица 2

Основные технические характеристики передатчика

Масса, г	< 5
Размер, мм	< 25 × 15 × 6
Длина антенны, мм	60
Датчики	GPS-приемник, акселерометр, магнитометр, датчик температуры
Определение местоположения	GPS/ГЛОНАСС/ (Galileo)
Интервал определения местоположения, час	1 (регулируемый)
Срок службы конструкции передатчика, месяц	более 9



а



б

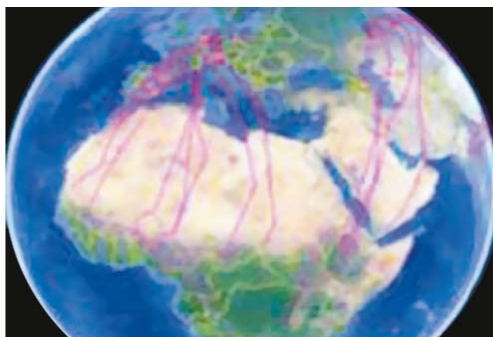
Научная аппаратура «Икарус» на российском сегменте МКС: а – размещение антенн аппаратуры «Икарус» на служебном модуле, б – блок электроники.
Фото РКК «Энергия»

Тестовые проверки системы выполнялись начиная с марта 2020 г., в сентябре 2020 г. был начат этап опытной эксплуатации системы, который успешно закончился в 2021 г. переходом на режим эксплуатации системы отслеживания с точностью 3–5 м миграции животных. За это время были реализованы десятки интересных, уникальных проектов. Координацию научных проектов различных организаций осуществлял сотрудник ИГ РАН Г.М. Тер-

тицкий. Например, по научным программам российских ученых изучались миграции черных дроздов, кукушек, сов, сайгаков, кабанов и многих других особей млекопитающих и птиц. Кроме того, теги были установлены на оползневых склонах Кавказа для оценки возможности контроля опасных сходов оползней.

На РС МКС в рамках КЭ «Ураган» отрабатываются методы, технологии и аппаратура для изучения земной

Пути миграции кукушек: слева – из России и Монголии через Индию в Африку и с Сахалина в Японию, а затем на острова Юго-восточной Азии; справа – из центральной Европы и западной России в Северную Африку и Аравийский полуостров. Wepler J., Belyaev M. etc. IAC-21-B3.3.7



поверхности. Отрабатываемые методы и аппаратура учитывают специфику МКС, прежде всего отсутствие возможности у этой станции, в отличие от станций «Салют» и «Мир», менять ориентацию. По этой причине с начала полета на РС МКС используются ручные приборы (ФСС, ВСС, фотоаппаратура), с помощью которых космонавты исследуют различные объекты и явления на земной поверхности. Для наведения используемой аппаратуры на российском сегменте применяются также специальные подвижные платформы, размещаемые как снаружи, так и внутри станции на иллюминаторах РС МКС. Использование подвижных платформ наведения позволяет изучать исследуемые объекты даже в период сна экипажа. Для управления наведением подвижных платформ используются специально разработанные методы оптимизации.

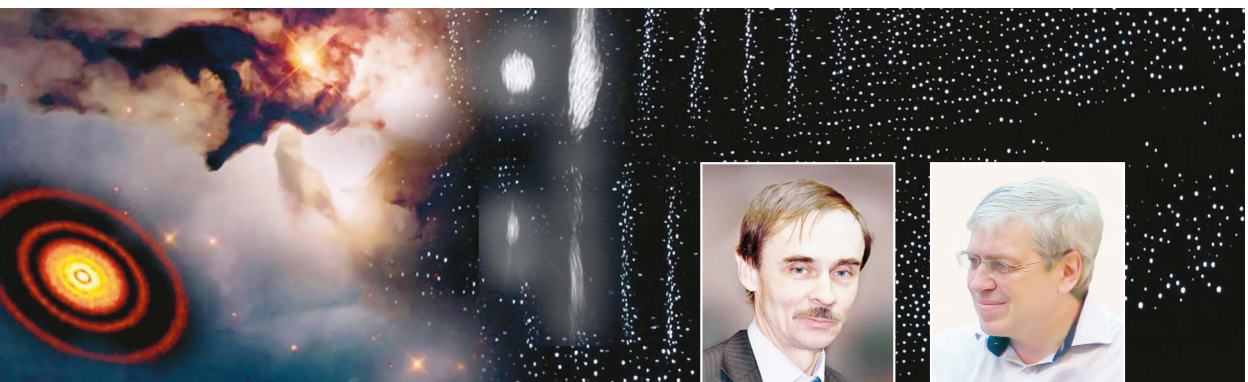
С помощью научных приборов КЭ «Ураган» к настоящему времени уже получено большое количество ценной информации, на основе которой проводились изучения ледников (Колка, Медвежий, Бивачный и др.), наводнений, вулканов, возникающих пожаров и т.д. С помощью аппаратуры «Икарус» изучаются миграции животных и птиц. Разработаны специальные методы, позволяющие эффективно планировать и проводить наблюдения с МКС, а также оценивать развитие некоторых потенциально опасных и катастрофических явлений и процессов. По результатам выполненных исследований опубликовано более 150 научных статей, некоторые из которых приведены в конце данной публикации, получены десятки патентов. Доставка на борт РС МКС новых приборов («Гиперспектрометр», «РИВР») позволит расширить исследования в широком диапазоне спектра электромагнитного излучения. Отработанные в КЭ «Ураган» технические

средства и методы будут использованы при создании автоматизированных спутниковых систем мониторинга и контроля земной поверхности.

Литература

1. *Беляев М.Ю.* Научная аппаратура и методы изучения Земли в космическом эксперименте «Ураган» на Международной космической станции // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18. № 3. С. 92–107.
2. *Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Караваев Д.Ю., Сармин Э.Э., Юрина О.А.* Аппаратура и программно-математическое обеспечение для изучения земной поверхности с борта российского сегмента Международной космической станции по программе «Ураган» // *Космонавтика и ракетостроение*. 2015. № 1. С. 63–70.
3. *Беляев М.Ю., Викальски М., Лампен М., Легостаев В.П., Мюллер У., Науманн В., Тертицкий Г.М., Юрина О.А.* Технология изучения перемещения животных и птиц на Земле с помощью аппаратуры ICARUS на российском сегменте МКС // *Космическая техника и технологии*. 2015. № 3. С. 38–51.
4. *Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Караваев Д.Ю., Легостаев В.П.* Использование съемки земной поверхности с МКС в интересах топливно-энергетического комплекса // *Известия РАН «Энергетика»*. 2013. № 4. С. 75–90.
5. *Беляев Б.И., Беляев М.Ю., Сармин Э.Э., Гусев В.Ф., Десинов Л.В., Иванов В.А., Крот Ю.А., Мартинов А.О., Рязанцев В.В., Сосенко В.А.* Устройство и летные испытания научной аппаратуры «Видеоспектральная система» на борту российского сегмента МКС // *Космическая техника и технологии*. 2016. № 2. С. 12–20.
6. *Беляев М.Ю., Беляев Б.И., Иванов Д.А., Катковский Л.В., Мартинов А.О., Рязанцев В.В., Сармин Э.Э., Силук О.О., Шукайло В.Г.* Атмосферная коррекция данных, регистрируемых с борта МКС. Часть II. Методика для изображений и результаты применения // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 6. С. 223–234.
7. *Беляев М.Ю., Волков О.Н., Соломина О.Н., Тертицкий Г.М.* Исследование миграций животных с помощью научной аппаратуры «Икарус» в космическом эксперименте «Ураган» в РС МКС // *Гирскопия и навигация*. 2022. Т. 30. № 3 (118). С. 3–19.

ЭКСПЕРИМЕНТ НА КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЕ «ПЛАЗМЕННЫЙ КРИСТАЛЛ-4»



ПЕТРОВ Олег Фёдорович,

академик РАН

ЗОБНИН Андрей Вячеславович,

доктор физико-математических наук

ЛИПАЕВ Андрей Михайлович,

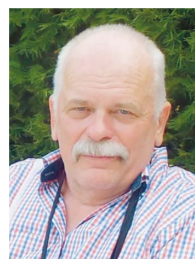
кандидат физико-математических наук

УСАЧЕВ Александр Дмитриевич,

кандидат физико-математических наук

Объединенный институт высоких температур РАН

DOI: 10.7868/50044394824020038



Электрические силы, действующие между заряженными пылинками в глубоком космосе, значительно превышают их гравитационное притяжение и играют значительную роль в кинетике образования пылинок и эволюции планетных систем, а эволюция пылевых плазменных облаков в космосе может значительно отличаться от эволюции непылевых облаков. Лабораторные эксперименты с пылевой плазмой на МКС помогают решению не только фундаментальных проблем в физи-

ке пылевой плазмы, но и оптимизации различных технологических процессов в энергетических и технологических плазменных установках.

Лабораторная пылевая плазма представляет собой смесь «обычной» низкотемпературной газоразрядной плазмы и пылевых частиц микронного размера – микрочастиц. Будучи погруженными в плазму, микрочастицы быстро заряжаются потоками электронов и ионов на их поверхность и приобретают равновесный постоянный заряд



Модель колец Сатурна крупным планом: заряженные «пылинки» могут быть размером несколько метров. Источник: <https://kipmu.ru/saturn/>

порядка 10^3 – 10^4 элементарных зарядов электрона в зависимости от размеров микрочастиц и параметров фоновой плазмы. Микрочастицы взаимодействуют друг с другом и с плазменными полями и потоками, участвуют в плазменном зарядовом балансе и, таким образом, являются не искусственной примесью к плазме, а ее полноправной имманентной частью. Для подчеркивания этого обстоятельства в зарубежной литературе часто используют термин комплексная плазма (complex plasma). Отличительной особенностью лабораторной пылевой плазмы является очень высокая степень неидеальности пылевой подсистемы Γ (гамма), которой обозначают отношение средней потенциальной энергии плазменной частицы E_p к их средней кинетической энергии E_k , $\Gamma = E_p / E_k$. Для пылевой подсистемы безразмерный параметр « Γ » может достигать сотен и даже тысяч единиц, что приводит к ее кристаллизации и другим интереснейшим

явлениям. Для сравнения укажем, что параметр не идеальности для газоразрядной плазмы без пылевой компоненты составляет лишь тысячные доли единицы, а в центре Солнца он едва достигает единицы.

В общем случае пылевая плазма включает в себя очень широкий класс объектов, как в окружающем мире, так и в технологических установках. К ним можно отнести серебристые облака, пылевые оболочки (комы) комет и околопланетные атмосферы, планетные кольца, протопланетные диски и межзвездные плазменно-пылевые облака¹. Вся Солнечная система наполнена пылевыми микрочастицами, что проявляется в наличии зодиакального света на нашем небосводе. Отметим крайнее разнообразие перечисленных объектов – различия в концентрациях

¹ Акимкин В.В. Протопланетные диски: эпоха великих космогонических открытий // Земля и Вселенная, 2017. № 3. С. 18–29.

плазменных частиц и размерах «пылинок» находятся в пределах десятка порядков величин. Например, размер пылинок в околозвездном и межзвездном пространстве составляет единицы и десятки нанометров, в то время как в кольцах Сатурна он достигает нескольких метров. В межзвездном пространстве микрочастицы заряжаются корпускулярными потоками, в то время как в кольцах Сатурна они заряжаются в основном ультрафиолетовым излучением Солнца. Электрические силы, действующие между заряженными пылинками в глубоком космосе, значительно превышают их гравитационное притяжение и играют значительную роль в кинетике образования пылинок и эволюции планетных систем, а эволюция пылевых плазменных облаков в космосе может значительно отличаться от эволюции не пылевых облаков. В последнее время существенно увеличилось количество научных работ, посвященных исследованию плазменно-пылевых атмосфер около Луны и Марса. Пылевую плазму можно встретить и гораздо ближе к нам – в технологических камерах для плазменного травления или напыления и в мощных энергетических установках, например, в токамаках². Для научных исследований в лабораториях пылевая плазма искусственно создается в газовых разрядах низкого давления с известными электрофизическими параметрами и специально изготовленными и инжектированными в плазму сферическими монодисперсными микрочастицами. Такие системы уже поддаются количественному описанию³.

² Тороидальная установка для магнитного удержания плазмы с целью достижения условий, необходимых для протекания управляемого термоядерного синтеза.

³ Zobnin A., Usachev A., Petrov O., Fortov V. et al. Two-dimensional positive column structure with dust cloud: Experiment and nonlocal kinetic simulation // *Physics of Plasmas*. 2018. V. 25. № 3. P. 033702 (1–13).

Интерес к пылевой плазме в научном сообществе резко вырос в 1994 г., когда практически одновременно и независимо друг от друга в двух научных группах из Германии и в одной группе специалистов из Тайваня экспериментально наблюдалось упорядочивание пылевых монодисперсных частиц в приэлектродной области высококачественного газового разряда, что согласовывалось с предсказаниями японского физика Хироюки Икези (Hiroyuki Ikezi) о возможности достижения в неравновесной газоразрядной плазме величины параметра неидеальности для пылевой подсистемы критической величины $\Gamma_c \cong 170$ и более⁴, при которых пылевая подсистема кристаллизуется⁵. В 1996 г. в Институте теплофизики экстремальных состояний РАН (ИТЭС РАН, в то время входил в состав Объединенного института высоких температур РАН, ОИВТ РАН) впервые в мире были получены плазменно-пылевые структуры в газовом разряде постоянного тока⁶. Главной проблемой всех лабораторных экспериментов являлась сила тяжести. Пылинки имели значительный вес и всегда стремились осесть на дно газоразрядных камер. Для их удержания в плазме использовались электрические силы в пристеночной плазменной области и в стратах разряда постоянного тока⁷. Тем не менее

⁴ Ikezi H. Coulomb solid of small particles in plasmas // *Physics of Fluids*. 1986. V. 29. № 6. P. 1764–1766.

⁵ Ichimaru S. Strongly coupled plasmas: high-density classical plasmas and degenerate electron liquids // *Reviews of Modern Physics*. 1982. V. 54. № 4. P. 1017–1059.

⁶ Фортвов В.Е., Нефёдов А.П. и др. Кристаллизация пылевой плазмы в положительном столбе тлеющего разряда // Письма в ЖЭТФ. 1996. Т. 64. Вып. 2. С. 86–91.

⁷ Страты – светлые слои, периодически чередующиеся с темными промежутками в положительном столбе разряда низкого давления, они существуют в ограниченном диапазоне условий по величине тока, роду газа, давлению, радиусу трубки.

получаемые в лабораториях плазменно-пылевые структуры были сильно искажены силой тяжести, а их размеры ограничивались габаритами плазменных областей, где была возможна компенсация гравитации Земли.

Для решения этой проблемы в 1996 г. академик Владимир Евгеньевич Фортов предложил разместить соответствующую научную аппаратуру на борту орбитального комплекса «Мир»⁸. Первый эксперимент на простейшей научной аппаратуре «Плазменный кристалл-1» (ПК-1) был проведен космонавтами А.Я. Соловьёвым и П.В. Виноградовым в январе 1998 г., который показал значительную зависимость скорости агломерации микрочастиц в стеклянной ампуле от наличия солнечного освещения. Сразу после экспериментов на аппаратуре ПК-1 была изготовлена и запущена на орбитальный комплекс «Мир» научная аппаратура ПК-2, которая предназначалась для исследования структурных свойств пылевой плазмы в положительном столбе тлеющего разряда постоянного тока. Использовались полидисперсные бронзовые микрочастицы со средним диаметром 130 мкм, введенные в трубку перед ее ампулизацией (полная изоляция от окружающей среды). Диаметр разрядной трубки составлял 32 мм, она была наполнена неоном при давлении 130 Па. Фактически единственным переменным регулируемым параметром был разрядный ток, который мог регулироваться космонавтом в диапазоне 0.1–1 мА. Микрочастицы подсвечивались специально сформированным плоским лазерным лучом (лазерным ножом), регистрировались видеокамерой и записывались на магнитную пленку

⁸ В.Е. Фортов (1946–2020), лауреат Государственных премий (1988, 1997, 2012), председатель Государственного комитета РФ по науке и технологиям (1996–1998), Президент РАН (2013–2017), директор Института теплофизики экстремальных состояний и ОИВТ РАН (1992–2018).

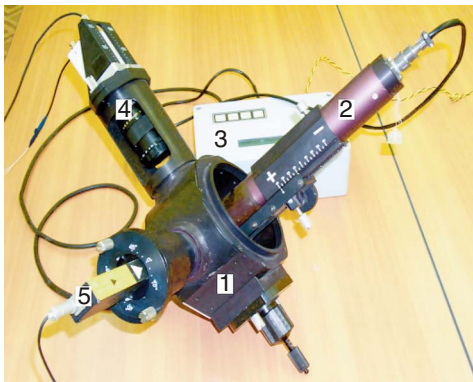


Академик В.Е. Фортов

видеомагнитофона. Эксперименты выполняли космонавты Г.И. Падалка, С.В. Авдеев, Ю.М. Батурин, А.Ю. Калери и С.В. Залётин в августе и октябре 1998 г. Анализ полученных изображений показал, что параметр неидеальности Γ пылевой подсистемы для исследованных режимов разряда составлял лишь около 50 единиц, что приводило к образованию плазменно-пылевой жидкости, но не плазменно-пылевого кристалла⁹. Тем не менее полученные данные и опыт стали надежной основой для дальнейшего развития более совершенной космической аппаратуры на борту пилотируемых орбитальных комплексов для исследования пылевой плазмы.

В 1999 г. космический эксперимент «Плазменный кристалл» по систематическому исследованию плазменно-пылевых систем был включен Российским

⁹ Нефёдов А.П., Ваулина О.С., Петров О.Ф. и др. Динамика макрочастиц в плазме тлеющего разряда постоянного тока в условиях микрогравитации // ЖЭТФ. 2002. Т. 122. Вып. 4 (10). С. 778–788.



Научная аппаратура «Плазменный кристалл-2»: 1 – держатель элементов; 2 – газоразрядная трубка; 3 – высоковольтный блок писания разряда; 4 – видеокамера; 5 – диодный лазер с коллимирующей оптикой. ОИВТ РАН

авиационно-космическим агентством в долговременную Программу научно-прикладных исследований на борту создаваемой Международной космической станции. История реализации российско-германских космических экспериментов на аппаратуре «Плазменный кристалл-3 Нефёдов»¹⁰ и «Плазменный кристалл-3 Плюс» подробно изложена в статье академика В.Е. Фортова «Эксперимент «Плазменный кристалл» на Международной космической станции»¹¹. В данной статье мы расскажем о дальнейшем развитии этого эксперимента, выполненного с помощью научной аппаратуры «Плазменный кристалл-4» (НА ПК-4).

¹⁰ Эксперимент назван в память об Анатолии Павловиче Нефёдове (1939–2001), исполнительном директоре ИТЭС РАН, профессоре, докторе технических наук, заслуженном деятеле науки РФ, который принимал самое активное участие в становлении и развитии космического эксперимента «Плазменный кристалл» на орбитальных станциях.

¹¹ Фортов В.Е. Эксперимент «Плазменный кристалл» на Международной космической станции // Земля и Вселенная. 2016. № 2. С. 3–16.

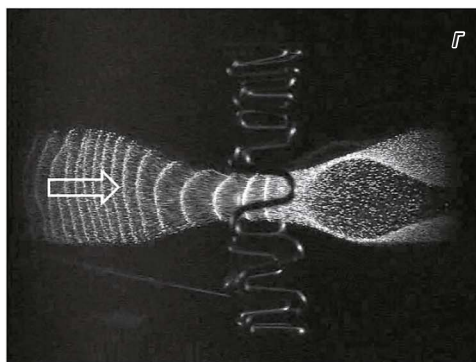
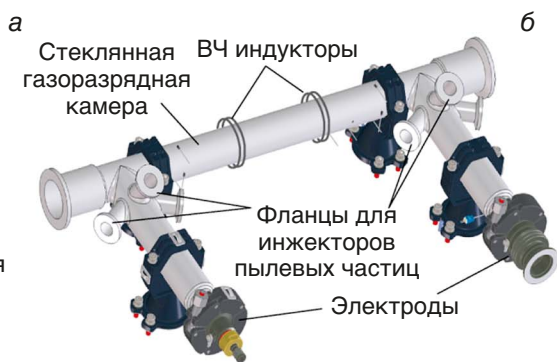
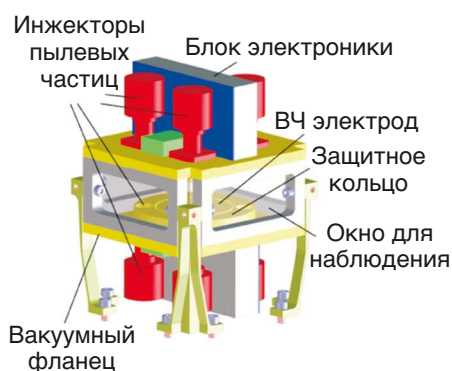
НАУЧНАЯ АППАРАТУРА

Разработка, изготовление, доставка на МКС, монтаж и эксплуатация научной аппаратуры ПК-4 с 2015 г. проводилась в рамках договора от 2012 г. между Роскосмосом и Европейским космическим агентством (ESA) о проведении совместного эксперимента на аппаратуре ПК-4 на борту МКС. Разработка аппаратуры велась совместно специалистами ОИВТ РАН и Института внеземной физики (ИВФ) Общества им. Макса Планка (Германия) под научным руководством директора ОИВТ РАН академика В.Е. Фортова и директора ИВФ профессора Г.О. Морфилла.

Плазменная газоразрядная вакуумная камера научной аппаратуры ПК-3 Плюс представляла собой параллелепипед с характерным размером 10 см и идеально подходила для исследования плазменно-пылевых структур и кристаллов. В отличие от нее камера ПК-4 образует П-образную трубку диаметром 3 см и длиной 75 см, которая предназначена в первую очередь для исследования газо-гидродинамических явлений в сильно неидеальной плазменно-пылевой жидкости и различных типов плазменно-пылевых волн. Иллюстрацией сказанного является существенно различное поведение пылевой плазмы в этих двух камерах разной геометрической формы.

Устройство научной аппаратуры ПК-4 подробно описано в статье российско-европейской команды по разработке данной аппаратуры¹², а схема ее экспериментального блока представлена на рисунке. По сравнению с НА ПК-2 это гораздо более совершенная и гибкая аппаратура. Разряд постоянного тока создается между элект-

¹² Pustynnik M. et al. Plasmakristall-4: New complex (dusty) plasma laboratory on board the International Space Station // Review of Scientific Instruments. 2016. Vol. 87. No. 9. P. 093505 (1–16).



Сопоставление газоразрядных вакуумных камер аппаратуры «Плазменный кристалл-3+» (а) и «Плазменный кристалл-4» (б), а также некоторых характерных для этих камер явлений: кристаллизации пылевой подсистемы (в) и сверхзвуковое протекание сильно неидеальной плазменно-пылевой жидкости через сопло Лавалья, сформированное электрическим потенциалом кольцевого электрода (г). Белая стрелка на части г показывает направление движения пылевой компоненты в постоянном поле разряда. Скорость пылевого звука для данных условий составляет 2.5 см/с. На выходе из сопла можно увидеть формирование конуса Маха аналогично тому, как формируются конусы Маха при сверхзвуковом истечении газа из газодинамического сопла. ОИВТ РАН, ИВФ Общества М. Планка (Германия)

троды на концах трубки, и однородный положительный столб равномерно заполняет все межэлектродное пространство за исключением небольшой области у катода. Значительным нововведением в ПК-4 является наличие режима разряда постоянного тока с переключаемой полярностью и регулируемой скважностью полярности разряда, что необходимо для управления положением пылевого облака вдоль оси трубки. В генераторе высокого напряжения ПК-4 доступны 4 временных функции высокого напря-

жения – прямоугольная, пилообразная, синусоидальная и постоянное напряжение. Частота переключения полярности может составлять от 1 Гц до 3 кГц максимум. Уже при частоте 50 Гц колебание микрочастиц в переключающемся поле разряда практически незаметно ввиду их сравнительно большой массы.

Для получения плазмы с более разнообразными параметрами газоразрядная трубка также оснащена двумя высокочастотными (ВЧ) индукторами. Комбинирование трех разрядов позво-

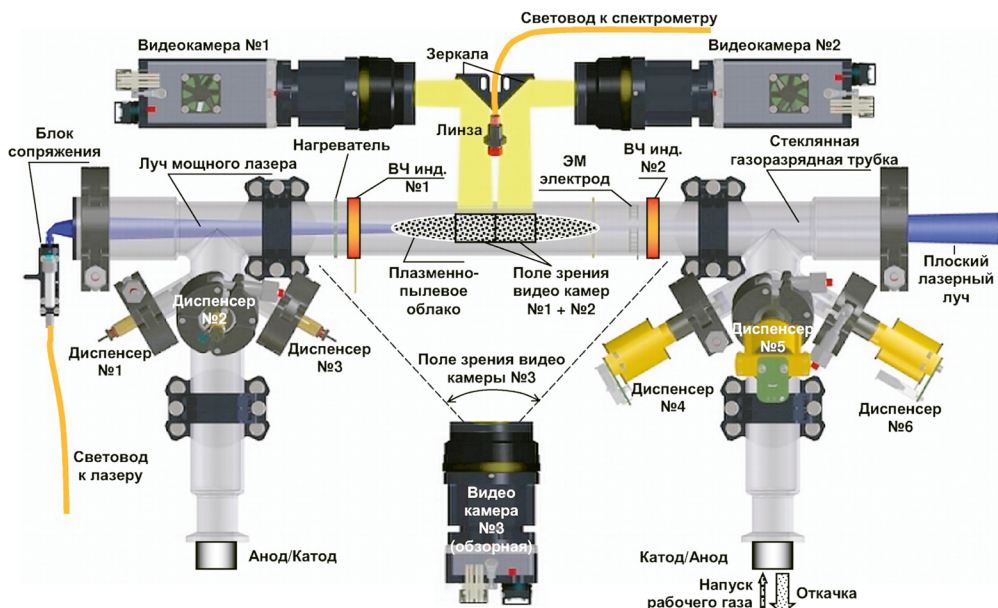


Схема экспериментального блока научной аппаратуры «Плазменный кристалл-4». ОИВТ РАН, ИВФ Общества М. Планка (Германия)

ляет в широких пределах управлять топологией исследуемых плазменно-пылевых образований, равно как и манипулировать ими. Кроме того, с целью возможности электрического воздействия на плазменно-пылевые структуры внутри разрядной камеры установлен дополнительный кольцевой манипуляционный электрод (ЭМ-электрод). Система откачки позволяет откачивать камеру до давления менее 0.002 Па, а система напуска – наполнять ее неоном или аргоном в диапазоне 1–250 Па и поддерживать это давление. Чистота газоразрядной плазмы поддерживается диффузной связью плазмы разрядной камеры с проточным каналом плазмообразующего газа. Монодисперсные пластиковые сферические микрочастицы диаметром от 1.3 до 10.4 мкм содержатся в 6 инжекторах и могут инжектироваться в плазму в необходимых количествах. Пылевые частицы в камере подсвечиваются специально сформированным плоским лазерным лучом толщиной около 0.1 мм и регистриру-

ются двумя видеокамерами высокого разрешения. Предусмотрена возможность сканирования лазерного ножа в направлении перпендикулярном его плоскости с целью определения трехмерной (3D) структуры плазменно-пылевого облака. Третья обзорная видеокамера позволяет наблюдать газовый разряд одновременно на длинах волн двух линий неона 585 и 703 нм, а также в диапазоне 400–800 нм. Небольшой спектрометр OceanOptics USB2000+ (США) обеспечивает непрерывное получение эмиссионных спектров разряда из одной выбранной области разряда в диапазоне 350–800 нм со спектральным разрешением 1.5 нм. Спектральные данные используются для оценки параметров плазмы (концентрации и температуры электронов), для контроля стабильности и чистоты плазмы. Газоразрядная трубка со всеми сопутствующими элементами и блоками смонтирована на дюралюминиевой плате и по требованиям безопасности на МКС



Устройство блока экспериментальной научной аппаратуры «Плазменный кристалл-4». ИВФ Общества М. Планка (Германия)

помещена в герметичный контейнер – блок экспериментальной аппаратуры.

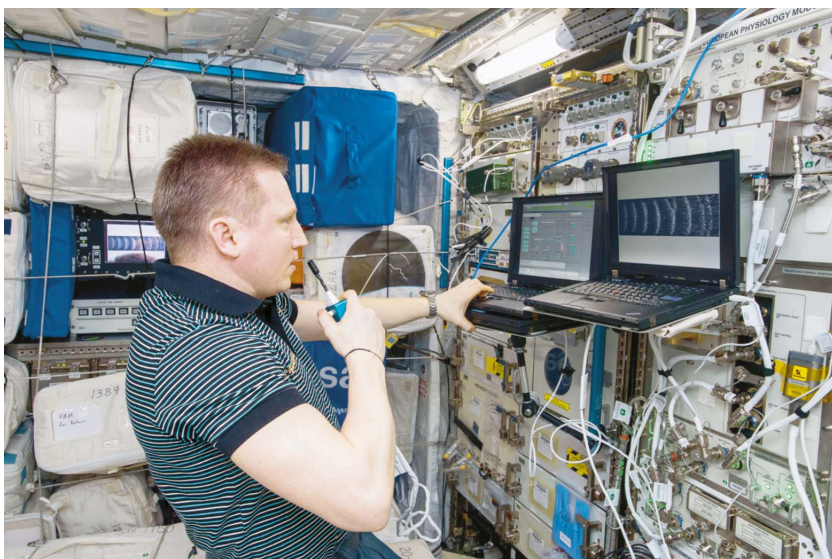
Помимо блока экспериментальной аппаратуры в состав НА ПК-4 также входят блок управления и записи информации, ноутбук с программой управления экспериментом, второй ноутбук для отображения видео из разрядной трубки и баллоны со сжатыми рабочими газами. Вся аппаратура была смонтирована в ноябре 2014 г. в стандартной приборной стойке европейского лабораторного модуля Columbus МКС российскими космонавтами А.М. Самокутьевым и Е.О. Серовой.

Экспериментальные исследования пылевой плазмы проводятся в центральной части разрядной трубки. Типичный сценарий эксперимента выглядит следующим образом. После глубокого вакуумирования разрядной трубки она заполняется выбранным газом до заданного давления. Далее, в труб-

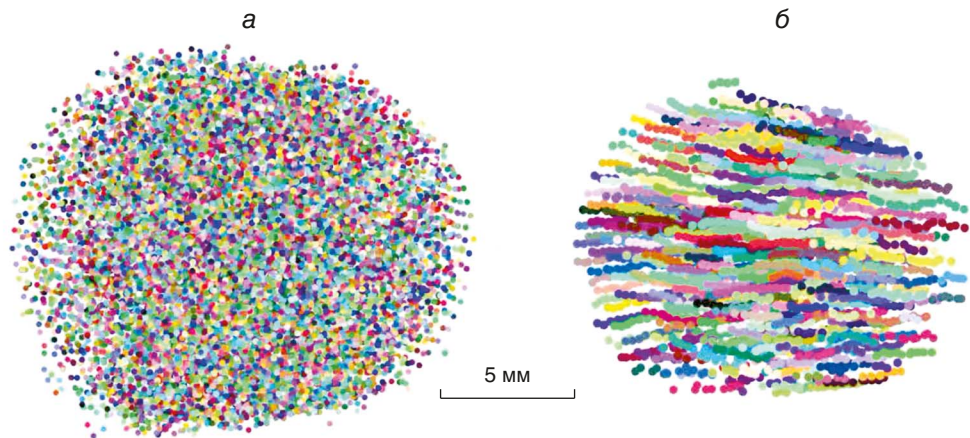
ке зажигается разряд постоянного тока и в него инжектируется требуемое количество микрочастиц одного или нескольких диаметров. Инжектированные в боковую часть трубки микрочастицы сразу заряжаются плазмой и транспортируются осевым электрическим полем в центральную часть трубки, где положение плазменно-пылевого облака фиксируется путем перевода разряда из режима постоянного тока в режим постоянного тока с переключаемой полярностью. С этого момента можно начинать реализовывать тот или иной сценарий научных исследований, заключающийся, в частности, в воздействии на стабилизированное плазменно-пылевое облако различными манипуляторами – ЭМ-электродом, ВЧ-индукторами, локальным нагревателем трубки и мощным лазерным лучом. Все параметры могут иметь как стационарное значение, так и модулироваться



Космонавт Е.А. Серова транспортирует блок экспериментальной аппаратуры «Плазменный кристалл-4» весом 100 кг для монтажа в стандартную приборную стойку европейского лабораторного модуля Columbus на МКС. Космонавт А.М. Самокутяев контролирует правильность монтажных работ и подсоединений. 2014 г. Роскосмос, ESA



Космонавт С.В. Прокопьев в лабораторном модуле Columbus МКС на связи с Землей проводит эксперимент «Плазменный кристалл» в январе 2023 г. в ходе выполнения 15-й экспериментальной серии. Ведущий космонавт по работе с аппаратурой «Плазменный кристалл-4» С.В. Прокопьев в 2017 г. провел глубокую модернизацию системы газо-напуска, в 2022 г. заменил материнскую плату компьютера приборной стойки лабораторного модуля Columbus МКС и участвовал в проведении трех экспериментальных серий. Роскосмос, ESA



3D-структура плазменно-пылевого облака в эксперименте на аппаратуре ПК-4:
 а) сразу после инъекции микрочастиц в разряд, плазменно-пылевое облако имеет изотропную жидкостно-подобную структуру б) через 5 минут после инъекции жидкостно-подобная структура трансформируется в структуру, описываемую как струнная жидкость. Ось трубки направлена вдоль цепочек микрочастиц – струн. ОИВТ РАН

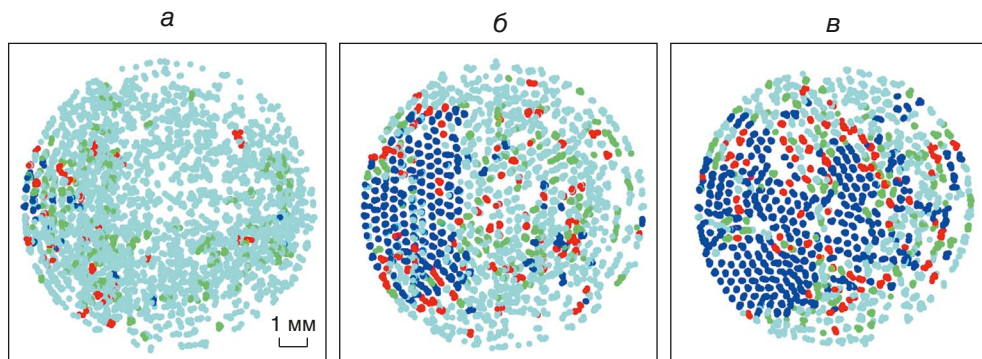
различными функциями, которые задаются управляющей программой конкретного эксперимента. Управление экспериментом проводится космонавтом с бортового ноутбука или операторами из Центра управления полетами с помощью нагрузками CADMOS в г. Тулуза (Франция) при участии специалистов ОИВТ РАН из ЦУПа в г. Королёв (Россия) и специалистов из университета им. Юстуса Либиха в г. Гиссен (Германия). Научное руководство проектом с российской стороны осуществляет директор ОИВТ РАН академиком Олегом Фёдоровичем Петровым, с европейской стороны – профессором Маркусом Томой из Университета им. Юстуса Либиха.

РЕЗУЛЬТАТЫ НЕКОТОРЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На первом этапе работ на аппаратуре ПК-4 исследовалась 3D структура протяженного плазменно-пылевого облака и ее эволюция методом сканирования облака тонким лазерным ножом при постоянных параметрах плазмы с целью

обнаружения каких-либо новых особенностей его структуры по сравнению с экспериментами на аппаратуре ПК-3 Плюс. Исследовалась эволюция 3D структуры суспензии микрочастиц в плазме разряда постоянного тока с переключаемой полярностью¹³. После вброса микрочастиц и прибытия их облака в экспериментальную область трубки разряд перевели в режим переключаемой полярности с частотой 500 Гц и провели сканирование облака. Его структура оказалась анизотропной жидкостного типа. Однако второе сканирование облака, проведенное через 6 минут после первого показало совсем другую картину – образование связанных цепочек микрочастиц различной длины, струнных кластеров или струн, в то время как между собой цепочки взаимодействовали относительно слабо. Учитывая это обстоятельство, обнаруженные структуры были названы струнной жидкостью, а их свойства, как

¹³ Mitic S. et al. Long-term evolution of the three-dimensional structure of string-fluid complex plasmas in the PK-4 experiment // Physica Scripta, 2021. V. 103. № 6. P. 063212 (1–7).



Упорядочивание изначально анизотропной плазменно-пылевой структуры в положительном столбе разряда постоянного тока величиной 0.5 мА при переключении полярности разряда с частотой 500 Гц в аргоне при давлении 28 Па. Временной интервал между фрагментами 2 минуты. Соответствие длины струн их цвету: 3–10 микрочастиц – синий, 10–15 – зеленый, 15–20 – красный, более 20 – голубой. Физика этого явления связана с образованием ионных кильватерных следов за микрочастицами в постоянном электрическом поле. Эксперимент выполнялся на аппаратуре ПК-4. Mitic S. et al. Phys. Rev. E. 2021. V. 103. № 6. P. 063212 (1–7)

выяснилось позднее, разительно отличаются от облаков с изотропной структурой. Физика этого явления связана с образованием биполярных ионных кильватерных следов за микрочастицами в постоянном электрическом поле.

Для количественного описания струнных структур был введен спектр длин струнных кластеров, показывающий, какую долю от общего числа струн приходится на струны с длиной в некотором интервале длин¹³. Нам удалось идентифицировать отдельные струны и измерить спектр их размеров в процессе формирования струнной жидкости из микрочастиц диаметром 3.38 мкм в разряде постоянного тока величиной 0.5 мА при частоте переключения полярности 500 Гц и давлении аргона 28 Па с интервалом в 2 минуты. Видно, что количество «длинных» струн со временем существенно растет, причем с одной стороны плазменно-пылевого облака, а радиальное положение самих струн упорядочивается в виде цилиндрических оболочек при шестиугольном порядке расположения струн на сечении. Влияние электрического поля на

структуру и свойства вещества называют электрореологией, а наблюдаемое упорядочивание можно интерпретировать как структурный фазовый переход¹⁴. Далее будет продемонстрировано влияние электрореологических эффектов на вязкость и скорость звука в пылевой подсистеме на аппаратуре ПК-4.

ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫЕ ВОЛНЫ

Плазменно-пылевые волны являются аналогом ионно-звуковых волн в плазме, но они обладают существенно меньшими фазовыми и групповыми скоростями – порядка сантиметров в секунду. В лабораторном плазменно-пылевом эксперименте очень часто наблюдаются самовозбуждающиеся видимые невооруженным глазом плазменно-пылевые волны, которые представляют собой пылевую акустическую неустойчивость при наличии постоянного электрического поля и достаточно низком дав-

¹⁴ Ivlev A. et al. Electrorheological complex plasmas // IEEE Transactions on Plasma Science. 2010. V. 38. № 4. P. 733–740.

лении плазмобразующего газа (обычно менее 25 Па). Пылевая акустическая неустойчивость всегда появляется в существенно нелинейном (не гармоническом) режиме с амплитудой волн плотности близкой к 100%, что проявляется в наличии целого спектра гармоник основной частоты и требует сложных теорий для своего описания. Подобные волны наблюдались и в кольцах Сатурна и проявлялись в виде радиальных «спиц» в периоды максимальной солнечной активности¹⁵.

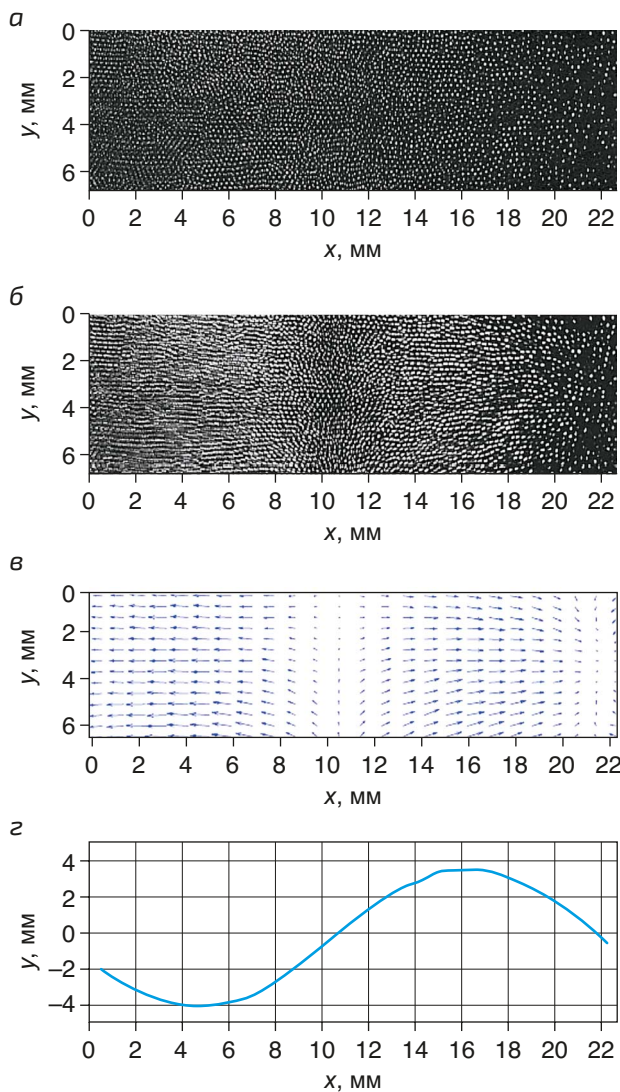
В нашей работе исследовались плазменно-пылевые волны предельно малой амплитуды, возбуждаемые дополнительным кольцевым ЭМ-электродом в диапазоне частот от 1 до 10 Гц в протяженном плазменно-пылевом облаке, состоящим из монодисперсных пластиковых микрочастиц диаметром 3.34 мкм¹⁶. Разряд постоянного тока величиной 0.5 мА с переключаемой полярностью создавался в аргоне при давлении 11 Па. Частота переключения полярности составляла 100–500 Гц. На первом этапе было получено однородное плазменно-пылевое облако длиной около 60 мм и диаметром 12 мм. Далее, на ЭМ-электрод, находящийся вблизи правого края, было подано отрицательное синусоидальное напряжение, обеспечивающее максимальный ток в разряд – 0.05 мА. Под действием этого электрода правая часть облака локально уплотнялась и разрежалась, далее это локальное гармоническое возмущение распространялось в направлении левой части облака. Целью эксперимента было определение фазовой скорости распространения возмущения (фазовой скорости пыле-акустической волны)

вдоль оси облака. Волна представляла собой небольшое возмущение счетной плотности микрочастиц и их гармоническое колебание относительно точки равновесия. Само облако в эксперименте было неподвижным. Оценки показали, что смещение микрочастиц можно измерить с большей точностью, чем колебание их счетной плотности. По двум последовательным изображениям было измерено смещение каждой из микрочастиц в поле зрения видеокamеры и определено поле скоростей микрочастиц. В научной литературе данный метод известен как PIV-method (Particle image velocimetry – измерение видимой скорости движения частиц)¹⁷. Данные поля скоростей были усреднены по вертикальным сегментам и преобразованы в распределение скоростей микрочастиц v_x вдоль оси трубки. На рисунке почти полностью уложилась одна длина волны. По смещению распределений v_x на последовательных кадрах определялась фазовая скорость плазменно-пылевой волны, которая составила от 5 до 25 см/сек и практически линейно зависела от частоты. Линейность волны контролировалась Фурье-анализом наблюдаемых колебаний. Высокое качество данных позволило дополнительно снизить амплитуду волны еще в несколько раз для достижения полностью линейного режима колебаний. Таким образом, впервые экспериментально было получено дисперсионное соотношение для плазменно-пылевой волны в 3D-облаке в линейном режиме. Аналогичным образом была измерена фазовая скорость волны вдоль струн в плазменно-пылевой струнной жидкости, которая оказалась в несколько раз меньше скорости волны в изотропном облаке жидкостного типа. Это наблюдение объясняется тем,

¹⁵ Уральская В.С. Новое о спутниковой системе Сатурна // Земля и Вселенная. 2005. № 5. С. 35–38; Черный В.В. Загадка колец Сатурна // Наука и жизнь. 2005. № 6. С. 45–52.

¹⁶ Naumkin V. et al. Excitation of progressing dust ionization waves on PK-4 facility // Physics of Plasmas. 2021. V. 28. № 10. P. 103704 (1–12).

¹⁷ Thomas E.Jr. Direct measurements of two-dimensional velocity profiles in direct current glow discharge dusty plasmas // Physics of Plasmas. 1999. V. 16. № 5. P. 2672–2675.



Измерение фазовой скорости плазменно-пылевой волны: а – невозмущенное однородное плазменно-пылевое облако, ток на ЭМ-электрод равен 0 мкА; б – то же облако, но на внутренний электрод подан гармонический ток с частотой 1.0 Гц и амплитудой 50 мкА, возбуждающий бегущую волну в облаке (для визуализации движения микрочастиц наложены 3 последовательных кадра видеоряда, в центре кадра наблюдается гребень пылевой волны, который движется влево); в – поле скоростей каждой из микрочастиц, определенное по данным (б) из гребня волны (область с максимальной счетной плотностью микрочастиц) микрочастицы движутся в области впадин; г – профиль осевого распределения осевых скоростей микрочастиц, усредненных по данным (в), гармоническая форма профиля осевой скорости полностью повторяет профиль напряжения на ЭМ-электроде, что говорит о линейности волнового режима. Эксперимент проводился на аппаратуре ПК-4. Naumkin V. et al. Excitation of progressing dust ionization waves on PK-4 facility // *Physics of Plasmas*. 2021. V. 28. № 10. P. 103704 (1–12)

что эффективная масса сильно связанных микрочастиц в струне в несколько раз больше массы отдельной пылинки, что и приводит к наблюдаемому эффекту уменьшения скорости звука¹⁸.

Интересные исследования проводились по бифуркации (расщеплению) плазменно-пылевых волн, вызываемых

электрическим полем разряда постоянного тока, при смене полярности разряда. В этом случае плазменно-пылевые волны перестраиваются под вновь появившиеся условия, в частности, появляются гребни новых волн, у которых был измерен инкремент нарастания амплитуды¹⁹. Показано, что локальная вели-

¹⁸ Schwabe M. et al. Slowing of acoustic waves in electrorheological and string-fluid complex plasmas // *New Journal of Physics*. 2020. V. 22. № 8. P. 083079 (1–18).

¹⁹ Jaiswal S. et al. Dust density waves in a dc flowing complex plasma with discharge polarity reversal // *Physics of Plasmas*. 2018. V. 25. № 8. P. 083705 (1–7).

чина электрического поля существенно влияет на волновую картину. Однако, очевидно, необходимы дальнейшие исследования (как теоретические, так и экспериментальные), чтобы понять нелинейную физику, лежащую в основе бифуркаций, и лучше обосновать роль электрического поля. Аппаратура ПК-4 предоставляет уникальную возможность варьировать среднее электрическое поле, испытываемое микрочастицами путем изменения скважности режима переключаемой полярности.

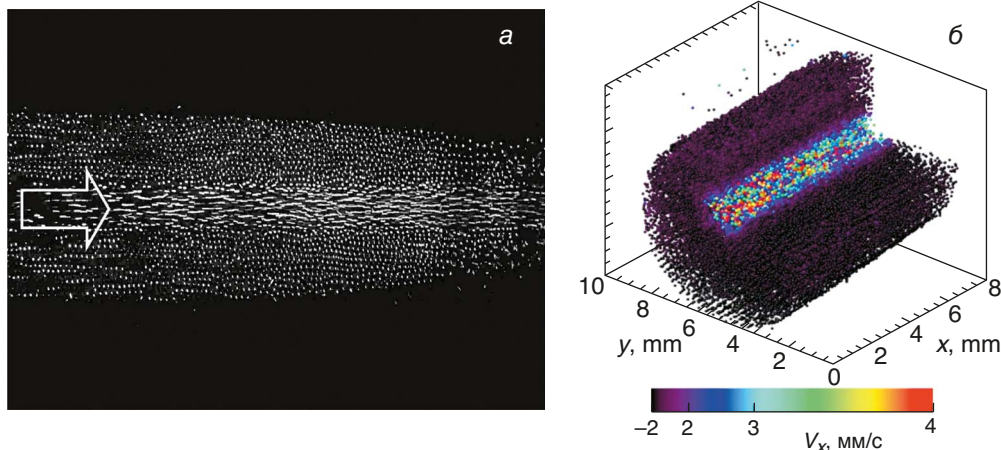
ИЗМЕРЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВОЙ ПОДСИСТЕМЫ

Вязкость или внутреннее трение – это свойство текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. В случае сдвига одной части вещества относительно другой проявляется сдвиговая вязкость в виде «трения» одного слоя о другой. Механизм внутреннего трения в жидкостях и газах заключается в том, что движущиеся молекулы переносят импульс из одного слоя в другой, что приводит к выравниванию скоростей слоев. Интенсивность переноса импульса движения между слоями зависит от температуры среды и потенциала межмолекулярного взаимодействия. Пылевая плазма дает возможность непосредственно по видео изображениям определять интенсивность переноса импульса движения между пылевыми слоями и таким образом непосредственно измерять вязкость пылевой подсистемы на кинетическом уровне.

Для теоретического описания вязкости пылевой подсистемы в настоящее время широко используется модель однокомпонентной системы частиц, взаимодействующих посредством экранированного кулоновского потенциала, а саму систему заряженных частиц

называют системой Юкавы. Знание вязкости в системах Юкавы необходимо при моделировании и расчетах транспортных свойств плазмы. Наличие в аппаратуре ПК-4 мощного лазера дает уникальную возможность инициировать сдвиговые течения в пылевой подсистеме, а видео диагностика позволяет на кинетическом уровне непосредственно определять диффузию количества движения от канала течения вглубь облака. Как и в уже изложенных здесь опытах, данный эксперимент выполнялся в протяженной суспензии микрочастиц, стабилизированной в разряде постоянного тока с переменной полярностью. Сдвиговый поток пылевой компоненты, когда одна ее часть движется относительно другой, создавался за счет действия силы радиационного давления луча мощного лазера на микрочастицы диаметром 3.34 мкм. Диаметр лазерного луча в суспензии составлял 3 мм, а его мощность варьировалась в диапазоне от 0.6 до 2.2 Вт. Характерный вид сдвигового течения в плазменно-пылевом облаке представлял собой локальную центральную область пылевого облака, движущуюся относительно неподвижной его части. Величина кинематической вязкости пылевой подсистемы определялась с помощью уравнений Навье-Стокса по уширению измеренного радиального профиля осевых скоростей микрочастиц относительно профиля скоростей, измеренного при выключенном разряде. К настоящему времени удалось определить только верхнюю границу кинематической вязкости пылевой подсистемы, которая оказалась в диапазоне от 0.2 до 6.7 мм²/с для четырех отдельных экспериментов²⁰. Эта оценка оказалась примерно на порядок-два ниже, чем сообщалось ранее в назем-

²⁰ Nosenko V. et al. Shear flow in a three-dimensional complex plasma in microgravity conditions // *Physiccal ReviewResearch*. 2020. V. 2. № 3. P. 033404 (1–5).



Сдвиговое течение в плазменно-пылевом облаке, индуцируемое лучом лазера: а – наложение трех последовательных кадров видеосъемки подчеркивает наличие потока микрочастиц в центральной области облака (белая стрелка обозначает направление лазерного луча); б – трехмерное поле осевых скоростей микрочастиц, определенное по сдвигу микрочастиц на последовательных видеокадрах при сканировании подсвечивающего лазерного ножа. Внизу показана шкала скоростей, с которыми движутся микрочастицы. Nosenko V. et al. *Physical Review Research*. 2020. V. 2. № 3. P. 033404 (1–5)

ных экспериментах с квази-трехмерной пылевой плазмой. Все эти более ранние эксперименты были проведены в лабораториях методом, аналогичным нашему, но в квази-трехмерном плазменно-пылевом облаке, левитирующем (парящем) в ВЧ-разряде в области около электрода²¹. Физика, лежащая в основе этой разницы, может заключаться в различной структуре плазменно-пылевых облаков в этих двух различных экспериментах. В плазменно-пылевом облаке на аппаратуре ПК-4 начинают формироваться струны, следовательно, поскольку луч идет вдоль струн, эффективность передачи количества движения между струнами может быть значительно снижена по сравнению с таковой в анизотропной структуре, где обмен количеством движения между слоями более интенсивен. Проверка

этой гипотезы потребует новых измерений на МКС, в которых вместе с улучшенными измерениями профилей скоростей и снижением мешающего давления плазмообразующего газа будет тщательно контролироваться и структура плазменно-пылевого облака. При необходимости анизотропная структура облака может поддерживаться периодическим его встряхиванием с помощью импульсов разрядного тока.

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ КЛАСТЕРОВ

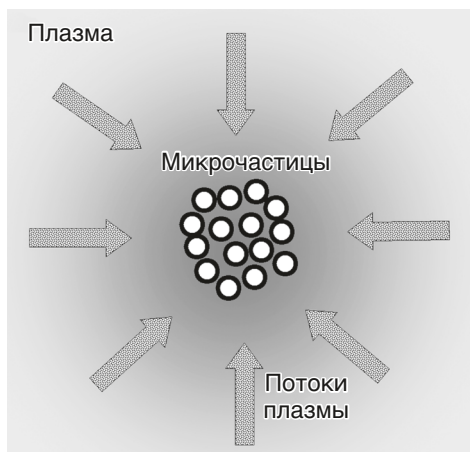
Пылевые микрочастицы, помещенные в газоразрядную плазму, заряжаются отрицательно благодаря высокой подвижности электронов, а одновременно заряженные частицы, как известно из закона Кулона, отталкиваются. Тем не менее, в начале 1990-х гг. физики-теоретики из Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН доктора

²¹ Ворона Н. и др. Вязкость плазменно-пылевой жидкости // ЖЭТФ. 2007. Т. 132. Вып. 4 (10). С. 941–948.

физико-математических наук А.М. Игнатов и В.Н. Цытович одновременно и независимо друг от друга обратили внимание на то, что на поверхности микрочастиц постоянно аннигилируются потоки электронов и ионов. Если эти потоки не симметричны, то на микрочастицу будет действовать сила ионного увлечения, заключающаяся в передаче импульса от направленного потока ионов к заряженной микрочастице. При сближении микрочастиц рекомбинирующие потоки на одну микрочастицу частично экранируются со стороны второй микрочастицы. В этом случае рекомбинирующий поток на микрочастицу становится несимметричным, и появляется сила притяжения микрочастиц, являющейся аналогом силы Лесажа²².

Теоретически было показано, что при достаточной плотности плазмы ($n_i, n_e > 10^{10} \text{ см}^{-3}$) сила притяжения может превысить силу кулоновского отталкивания одноименно заряженных микрочастиц. В этом случае могут образоваться плазменно-пылевые структуры, удерживаемые не внешней электростатической ловушкой, а исключительно плазменными потоками, комбинирующими на поверхности микрочастиц. В этом случае появляется неограниченный простор для появления новых связанных плазменно-пылевых самоорганизующихся молекул и структур. Безудержная фантазия теоретиков и их расчеты породили

²² Теория, разработанная в 1756 г. женеvским математиком Ж.Л. Лесажем, утверждает, что сила гравитации – это результат движения крошечных частиц, двигающихся на высокой скорости во всех направлениях во Вселенной. Интенсивность потока частиц предполагается одинаковой во всех направлениях, таким образом, изолированный объект ударяется частицами со всех сторон, в результате чего он подвергается давлению внутрь объекта, но не подвергается направленной силе. Ignatov A.M. Lesage Gravity in Dusty Plasma // Plasma Physics Reports. 1996. V. 22. № 7. P. 585–589.



Плазменно-пылевой кластер сжимается плазменными потоками, которые рекомбинируют на поверхности микрочастиц

идею, что плазменно-пылевые цепочки сами могут сворачиваться в спирали. В результате сделан вывод, что сложные самоорганизующиеся плазменные структуры обладают всеми необходимыми свойствами, позволяющими квалифицировать их как кандидатов в межзвездную неорганическую живую материю, которая может существовать в космосе при определенных условиях, позволяющих им развиваться естественным путем²³. Однако прямое наблюдение притяжения микрочастиц состоялось только в 2021 г. на аппаратуре ПК-4. Проблема заключалась в том, что большая требуемая плотность плазмы приводила к немедленному разрушению всех плазменно-пылевых структур и выносу микрочастиц на стенки разрядных камер. Решение было найдено в резком увеличении (на порядок величины) плотности плазмы в газоразрядной трубке, при которой плазменно-пылевые кластеры успевали сфор-

²³ Tsytovich V.N., Morfill G.E., Fortov V.E. et al. From plasma crystals and helical structures towards inorganic living matter // New Journal of Physics. 2007. V. 9. № 8. P. 263 (1–11).

мироваться до их выброса на стенки камеры, как это проиллюстрировано справа на коллаже заставки статьи.

В заключение отметим, в данной статье мы совсем не коснулись других полученных результатов, таких как, например, обнаруженную в первом же эксперименте новую поперечную ионизационную неустойчивость протяженного плазменно-пылевого облака и выражающуюся в его поперечном колебании с частотой около 20 Гц²⁴. Методами эмиссионной спектроскопии зарегистрировано повышение температуры электронов в области плазменно-пылевого облака²⁵. Получены новые результаты о сепарации микрочастиц по размерам в бинарных плазменно-пылевых системах (системах, состоящих из микрочастиц двух размеров) в высокочастотном разряде и разряде постоянного тока, а также среде с градиентом температуры. Продолжаются исследования структурных фазовых переходов в динамических бинарных системах, когда движимая электрическим полем фракция с микрочастицами меньшего диаметра проходит через облако микрочастиц большего диаметра с образованием неравновесных цепочечных структур. Продолжаются исследования сжимаемости плазменно-пылевых облаков с помощью ударных волн пылевой плотности, начатые по инициативе В.Е. Фортова. С помощью соотношений Рэнкина-Гюгония, описывающих сохранение массы и момента количества движения на границе разрыва плазменно-пылевой ударной

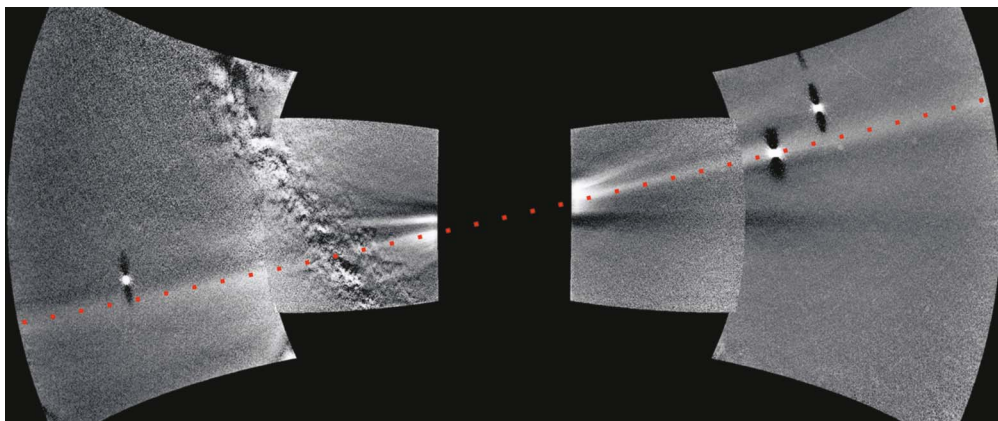
волны, впервые была построена ударная адиабата для пылевой подсистемы, определяющая электростатическое давление за фронтом ударной волны при разных степенях сжатия плазменно-пылевого облака²⁶. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало, что длина экранирования в плотной пылевой плазме определяется не полной плотностью ионов, а только теми «эффективными» ионами, которые не связаны с отрицательно заряженными пылинками.

Помимо своего фундаментального научного интереса и упоминавшихся астрофизических приложений полученные данные имеют и значительное практическое значение. Во всех плазменных и энергетических установках неизбежно имеется контакт горячей плазмы с холодными стенками, что приводит к их испарению. При достижении критической концентрации испаряющаяся фракция начинает конденсироваться в пылинки уже в плазменном объеме. Таким образом, получается «технологическая» пылевая плазма. В ряде случаев, например, при плазменном травлении кремниевых подложек или в камерах токамаков, пылевая фракция нарушает технологический процесс. Здесь очень полезными являются наработанные знания о пылевой плазме, позволяющие смоделировать ситуацию и предложить механизмы для отвода и утилизации пылевой фракции с целью минимизации загрязнения высокотемпературной плазмы тяжелыми элементами. С другой стороны, явление конденсации испаряемой подложки в плазменном объеме можно использовать для производства структурированных материалов с заданными составами и свойствами. Плазменная очистка поверхности

²⁴ Zobnin A.V. et al. Transverse ionization instability of the elongated dust cloud in the gas discharge uniform positive column under microgravity conditions // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 774. P. 012174 (1–7).

²⁵ Usachev A.D. et al. Influence of dust particles on the neon spectral line intensities at the uniform positive column of dc discharge at the space apparatus “Plasma Kristall-4” // *Journal of Physics: Conf. Series*. 2018. Vol. 946. P. 012143 (1–8).

²⁶ Usachev A.D. et al. Externally excited planar dust acoustic shock waves in a strongly coupled dusty plasma under microgravity conditions // *New Journal of Physics*. 2014. V. 16. № 5. P. 053028 (1–18).



Первое в истории панорамное изображение плазменно-пылевого кольца вокруг Венеры, полученное космическим аппаратом Parker Solar Probe (США). Кольцо тянется по диагонали от нижнего левого края до верхнего правого края изображения (отмечено красным пунктиром), яркие объекты – Земля, Венера и Меркурий (слева направо). Часть галактики Млечный Путь видна с левой стороны. Составлено из четырех кадров, полученных 25 августа 2019 г. NASA/JPL/APL

наночастиц и их пространственная сепарация по размерам создают уникальные технологические преимущества, недоступные другим методам.

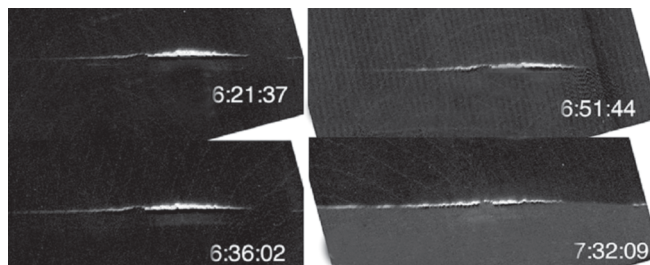
В последнее время в связи с интенсификацией освоения Луны актуализировался вопрос с парящей лунной пылью, впервые обнаруженной в 1968 г. американскими автоматическими станциями Surveyor-6 и Surveyor-7²⁷. Мигрирующая лунная пыль может проникать в критические узлы посадочных модулей и вызывать отказы аппаратуры. Для предотвращения этого необходимо знание распределения электрического потенциала вокруг посадочного модуля в разное время лунных суток и оценка размеров и зарядов левитирующих (парящих) лунных пылевых частиц в условиях околосолнечной плазмы. Вполне возможно, что в критических условиях для защиты от лунной пыли придется устанавливать проволоочные электростатические экраны.

²⁷ Зелёный Л.М., Захаров А.В., Борисова Т.А. Лунная пыль // Земля и Вселенная. 2017. № 3. С. 3–17.

Приведенные и другие данные демонстрируют уникальный научный потенциал научной аппаратуры ПК-4, а присутствие космонавтов значительно повышает ее надежность и возможность длительной эксплуатации. Продолжительный опыт эксплуатации ПК-4 позволяет постановщикам ставить все более сложные эксперименты на борту МКС и далее, на будущей российской орбитальной станции РОС²⁸.

В настоящее время под научным руководством директора ОИВТ РАН академика РАН О.Ф. Петрова ведется подготовка новых плазменно-пылевых космических экспериментов. Первый – это эксперимент «Пыль-УФ», целью которого является получение и изучение плазменно-пылевых образований, индуцированных УФ-излучением Солнца в открытом космическом пространстве, а также их радиочастотное и оптическое зондирование. Плазменно-пылевое облако будет создаваться на безопасном удалении от МКС с помощью

²⁸ Первый этап развертывания станции запланирован на 2027–2030 гг.



Низкоуровневое свечение лунного горизонта во время захода Солнца (указано время), наблюдаемое автоматической станцией Surveyor-7, которое представляет собой рассеянный солнечный свет на частицах заряженной пыли, парящих вблизи поверхности Луны. 23 января 1968 г. NASA/JPL

специальных пусковых контейнеров, установленных на транспортном корабле «Прогресс». Ожидается получение новой информации о поведении космической пыли, облучаемой солнечным ультрафиолетовым излучением и высокоэнергетичными атомными частицами, а также о коллективных эффектах, регулярной и стохастической динамике микрочастиц в условиях околоземного космического пространства. Полученные данные будут полезными при разработке новой аппаратуры для контроля плазменно-пылевого окружения космических аппаратов на орбитах Земли и Луны.

Еще один разрабатываемый эксперимент для проведения на борту космической станции в условиях микрогравитации «Кулон-плазма» посвящен изучению самоорганизации активных броуновских микрочастиц в плазме газовых разрядов и в коллоидных системах в условиях микрогравитации²⁹. Активными называют микрочастицы, которые получают энергию извне, например, от лазерного луча или от электрического поля, и преобразовывают ее в энергию поступательного движения, причем характер и механизм этого преобразования может быть совершенно различными. Активные

системы – это сравнительно новая научная область, которая сегодня объединяет физиков, химиков и биологов. Исследования в этой сфере, находящейся на стыке наук, интенсивно проводятся во всем мире.

Авторы благодарят Роскосмос и Европейское космическое агентство за техническую помощь в проведении космического эксперимента на научной аппаратуре ПК-4 на борту МКС. Авторы выражают искреннюю благодарность Томасу Хубертусу, Михаилу Пустыльнику, Маркусу Томе, всем членам международной научно-технической группы по эксплуатации аппаратуры ПК-4 (ПК-4 Facility Science Team), а также космонавтам и инструкторам ЦПК им. Ю.А. Гагарина за сотрудничество и участие в проведении экспериментов на борту МКС.

Литература

1. Комплексная и пылевая плазма: из лаборатории в космос / Под редакцией В.Е. Фортова и Г.О. Морфилла. М.: Физматлит, 2013.
2. Фортон В.Е., Батулин Ю.М., Морфилл Г.О., Петров О.Ф. Плазменный кристалл. Космические эксперименты. М.: Физматлит, 2015.
3. Кузнецов И.А., Захаров А.В., Зеленый Л.М. и др. Пылевые частицы в космосе: возможности экспериментальных исследований // Астрономический журнал. 2023. Т. 100. № 1. С. 41–69.
4. Beckers J. et al. Physics and applications of dusty plasmas: The Perspectives 2023 // Physics of Plasmas. 2023. V. 30. № 12. P. 120601 (1–51).

²⁹ Petrov O.F., Statsenko K.B., Vasiliev M.M. Active Brownian motion of strongly coupled charged grains driven by laser radiation in plasma // Scientific Reports, 2022. V. 12. Article number 8618.

ФАНТОМЫ-СВИДЕТЕЛИ, КОСМОНАВТЫ И РАДИАЦИЯ



ШУРШАКОВ Вячеслав Александрович,

кандидат физико-математических наук

ИВАНОВА Ольга Алексеевна,

кандидат физико-математических наук

КАРЦЕВ Иван Сергеевич,

кандидат технических наук

Институт медико-биологических проблем РАН

DOI: 10.7868/5004439482402004X

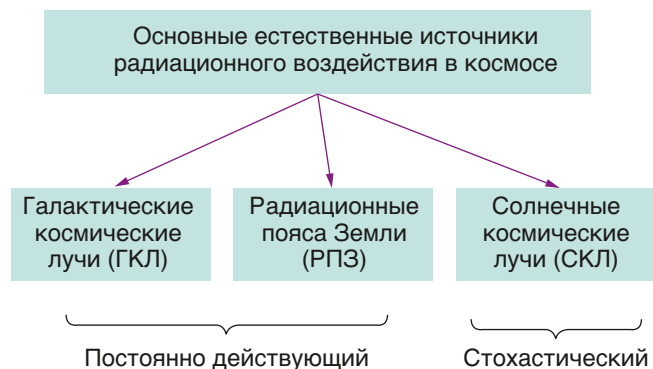


С чем ассоциируется слово «радиация»? Кто-то сразу вспомнит о подвигах ликвидаторов аварии на Чернобыльской атомной станции, а кто-то – о разрушенных атомными бомбами японских городах Хиросима и Нагасаки. Ну а кто-то будет вспоминать дату последнего посещения поликлиники, когда лечащий врач выписал направление на рентгеновский снимок грудной клетки. Такое явление, как радиация, обычно никак не связывается ни с полетами в космос, ни с профессией «космонавт». И все же отделять их нельзя. Ведь радиация – неотъемлемый и неустраняемый фактор любого окружающего пространства, в том числе космического, вдали от Земли, где вопрос радиационной безопасности особенно актуален. Как радиация ограничивает

наши возможности, как долго с учетом радиационного фактора можно безопасно для здоровья пребывать в условиях космического полета – попробуем вместе разобраться.

ИСТОЧНИКИ РАДИАЦИИ В КОСМОСЕ

Когда в начале XX века появились простейшие дозиметры – счетчики Гейгера, – было обнаружено, что чем выше подняться в горы, тем больше частота срабатывания этого счетчика. Это обстоятельство предполагало нахождение источника радиации где-то высоко, ближе к границе земной атмосферы. Позже, уже на заре космической эры, в конце 50-х годов прошлого века,



Основные источники радиационной опасности в околоземном космическом пространстве. Рисунок В.А. Шуршакова

на первых советских и американских спутниках с помощью модернизированных счетчиков Гейгера были открыты так называемые радиационные пояса Земли (РПЗ) – области повышенной, «захваченной» земным магнитным полем радиации. Эти области геометрически напоминают бублик, они охватывают земной шар с максимумом излучения в районе экватора. РПЗ образованы захваченными магнитным полем потоками заряженных частиц, в основном протонов и электронов. Кроме того, на границу земной атмосферы непрерывно воздействуют галактические космические лучи (КЛ), приходящие к нам из отдаленных глубин космоса. В состав галактических КЛ входят ядра практически всех элементов таблицы Д.И. Менделеева, ускоренные до очень больших энергий.

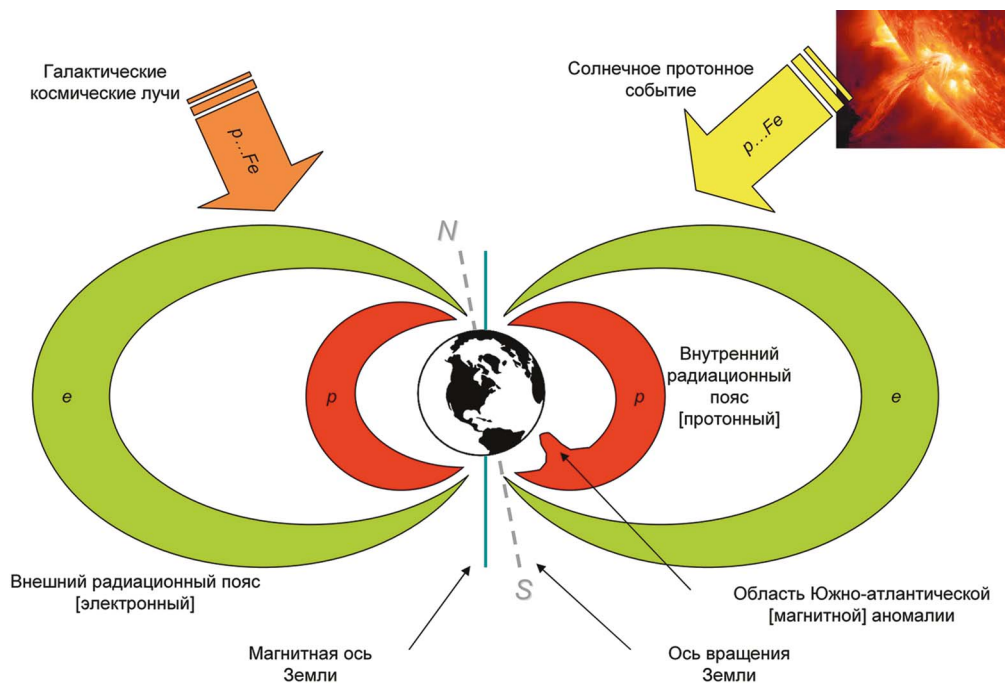
В периоды повышенной солнечной активности к потокам частиц РПЗ и галактических КЛ на короткое время, порядка 1 суток, добавляются и солнечные КЛ, приходящие от нашего Солнца на трассу полета космического корабля. РПЗ и галактические КЛ воздействуют постоянно и создают в отсеках космического корабля тот самый радиационный фон, который непрерывно облуча-

ет космонавтов в полете. Определенную интригу создает тот факт, что в отдельные периоды, несколько раз за 11-летний солнечный цикл, случайным образом (стохастически) к этому фону добавляется воздействие частиц солнечных КЛ. В этом случае дозы радиации на борту космического аппарата, хотя и на короткое время, с маленькой, но не-

нулевой вероятностью могут возрасти в десятки, а то и сотни раз!

Не случайно с самого начала эры пилотируемых космических полетов проблеме радиационной безопасности космонавтов уделялось особое внимание: уже у первых космонавтов были простые, но надежные индивидуальные дозиметры. Это были специальные пленочные дозиметры, посмотреть полученные дозы в процессе полета тогда не представлялось возможным. Пленки обрабатывали и дозы определяли уже на Земле, в лабораторных условиях.

Итак, практика пилотируемых космических полетов подтвердила, что в космическом полете человек непрерывно подвергается повышенному радиационному облучению. Доза облучения на борту космической станции зависит от многих факторов: длительности полета, параметров орбиты, фазы 11-летнего цикла солнечной активности (минимум, максимум, фаза роста, фаза спада), а также от условий защищенности в конкретном отсеке станции. Получаемая космонавтами доза радиации зависит и от обусловленной солнечной активностью «космической погоды» в период полета – от наличия магнитных бурь и от проникновения на трассу полета заряженных частиц высокой энергии (солнечных КЛ).



Схематическое представление источников космической радиации в околоземном космическом пространстве. Рисунок авторов

ЗЕМЛЯ – НАШ ОБЩИЙ КОСМИЧЕСКИЙ КОРАБЛЬ

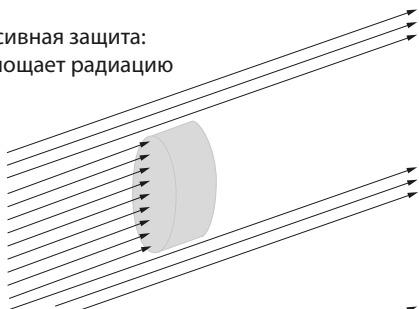
Отметим, что на поверхности Земли также присутствует естественный радиационный фон, который частично обусловлен наличием радиации в окружающем космическом пространстве и, как уже отмечалось, тем выше, чем выше над уровнем моря мы поднимаемся. Если представить, что Земля – это космический корабль, то у этого корабля есть две составляющие защиты от радиации: земная атмосфера и геомагнитное поле.

Защитные свойства какого-либо материала от радиации в первую очередь характеризуют поверхностной плотностью, которая равна произведению плотности защитного вещества на толщину слоя защиты. Радиационная защита в отсеке станции может быть

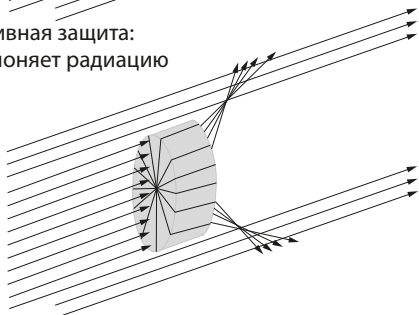
тонкая, но сделана из относительно плотного вещества, например, из алюминия, или наоборот, более толстая, но из вещества с малой плотностью, например, из полиэтилена. При этом ее поверхностная плотность, масса и сами защитные свойства будут примерно одинаковы.

Земная атмосфера простирается высоко в небо, а плотность ее, как известно, уменьшается с высотой. Если посчитать по всей протяженности атмосферного столба, то в среднем получим защиту толщиной примерно 1000 г/см^2 , что соответствует 10 м слоя воды, имеющей плотность 1 г/см^3 . Таким образом, у Земли, как у космического корабля, толщина «стенки», отделяющей нас от источников космической радиации, равна примерно 10 м воды. Конечно же, такую толщину защиты нельзя обеспечить для современных пилотируемых космических комплексов. Например,

Пассивная защита:
поглощает радиацию



Активная защита:
отклоняет радиацию



Защита от радиации веществом
и магнитным полем. Источник:
Spillantini P. et al. 2007

в каюте Служебного модуля МКС космонавт отделяет от открытого космоса 4 мм алюминия или всего-то 1.2 см радиационной защиты в пересчете в водный эквивалент. Вот и сравните 1.2 см и 10 м водного слоя. Поэтому-то на космической станции и дозы радиации «космические», а на поверхности Земли – «земные».

У Земли есть магнитное поле, которое тоже защищает нас от космической радиации. И такого вида защиты у современных комических кораблей и станций пока нет! Магнитное поле, как известно, не изменяет энергию заряженной частицы, но закручивает ее траекторию в спиралевидные линии, отклоняя частицы от первоначального направления. Земным магнитным полем обеспечивается защита в большей степени вблизи геомагнитного экватора и средних широт, в то время как высокоширотные области вблизи магнитных полюсов остаются практически открытыми для проник-

новения ионизирующей космической радиации (с чем связано появление такого красивейшего природного явления, как полярные сияния).

Фоновая радиация на поверхности Земли заметно отличается от космической, прежде всего по составу. Для наземных источников характерно излучение гамма-квантами, альфа-частицами, нейтронами с относительно малыми энергиями от природных радиоактивных изотопов; дополнительный вклад в облучение вносят техногенные источники: атомные реакторы, ускорители заряженных частиц, медицинская техника, например, с использованием рентгеновского облучения и изотопов и т.п. В космическом пространстве основной вклад в дозу радиации дают потоки заряженных частиц, ускоренных до высоких энергий, которые могут проникать внутрь станции через относительно тонкую защиту отсека.

МНОГО ИЛИ МАЛО РАДИАЦИИ В ОТСЕКЕ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ – ВСЕ ОТНОСИТЕЛЬНО

Для оценки радиобиологических эффектов радиации используют специальную величину: эквивалентную дозу, измеряемую в Зивертах (Зв). Мы далее, по сложившейся традиции, будем приводить характерные дозовые величины космической радиации в миллизивертах (мЗв).

Орбитальные космические станции («Мир», МКС) летают не так уж далеко от Земли: типичная высота орбиты 400 км при наклонении орбиты к плоскости экватора 51.6. С учетом результатов многолетней практики Службы радиационной безопасности пилотируемых космических полетов, работающей на базе Института медико-биологических проблем РАН, можно заключить, что средняя доза радиации

в отсеке космической станции приблизительно в 200 раз больше, чем средний естественный фон на поверхности Земли, которым человек облучается непрерывно. Так, за год полета на МКС при невозмущенной радиационной обстановке (без учета возможного вклада солнечных КЛ) космонавт при среднесуточной мощности дозы 0.6 мЗв/сут получает дозу 220 мЗв/год. Это более чем в 10 раз превосходит разрешенную дозу для работника атомной промышленности за год (в среднем 20 мЗв/год). Годовая же доза космонавта сопоставима с дозой 200 мЗв, которую в исключительных случаях допускается получать ликвидаторам ядерных аварий! Отметим еще, что средняя доза пациента при рентгеновском обследовании грудной клетки составляет 0.1 мЗв, тогда, если сравнить с дозой, получаемой космонавтом за сутки, эта доза эквивалентна тому, что за каждый

день полета космонавту 6 раз делают рентгеновский снимок.

Приведенные выше сопоставления характеризуют значимый уровень радиационной опасности для профессии «космонавт» в сравнении с большинством других профессий. Да, не всех берут в космонавты, но для сохранения их здоровья установлены специальные космические дозовые нормативы, превышать которые нельзя. По очевидной причине для космонавтов нельзя использовать те же годовые дозовые нормативы, что и для персонала атомной промышленности (всего 20 мЗв/год), ведь тогда мы будем вынуждены существенно ограничить продолжительность их орбитальных полетов – не более 1 месяца. Современные российские нормативы лимитируют дозу для космонавтов в размере 300 мЗв/год (на кроветворные органы, о чем речь пойдет ниже), поэтому

Таблица 1

Характерные величины дозовых нагрузок для современных пилотируемых космических полетов в сопоставлении с нормативами по ограничению дозового воздействия в наземной и космической практике

№ п/п	Местонахождение и длительность воздействия радиации	Доза, мЗв
1.	Фоновая доза на поверхности Земли за сутки / год	0.003 / 1.1
2.	Доза на борту космической станции за сутки / год	0.6 / 220
3.	Дозовый предел за 1 год для персонала атомной промышленности группы А на Земле (в среднем за 5 лет)	20
4.	Доза за рентгеновский снимок грудной клетки	0.1
5.	Доза при внекорабельной деятельности при продолжительности до 6 часов	0.5
6.	Доза от мощного солнечного протонного события (СПС) на околоземной орбите	6
7.	Доза от мощного СПС вне магнитосферы Земли	600
8.	Основные дозовые пределы для космического полета (кроветворная система) примерно за 1 сут. / за 1 мес. / за 1 год	100 / 150 / 300
9.	Профессиональный предел дозы космонавта и наземного персонала группы А за весь период профессиональной деятельности	1000

указанная выше годовая дозовая нагрузка на космонавтов при орбитальных полетах (около 220 мЗв/год) является допустимой по критерию радиационной безопасности. Установленный годовой дозовый лимит является в определенном смысле оптимальным, так как ограничивает дозовую нагрузку на космонавта вблизи реально достижимого уровня с учетом неблагоприятных радиобиологических эффектов, а дальнейшее снижение разрешенного уровня дозового воздействия приведет к необходимости сокращения продолжительности полета на орбитальной станции.

Уровни радиационного воздействия от всех рассмотренных выше источников космической радиации систематизированы в таблице, где для прямого сопоставления масштабов величин представлены дозовые нагрузки для современных пилотируемых космических полетов наряду с используемыми нормативами, принятыми в наземной и космической практике. Отметим, что приведенные в таблице дозы космической радиации являются усредненными оценками дозовых нагрузок в отсеке орбитальной космической станции.

Обратим внимание на последнюю строчку в таблице. И для космонавтов, и для наземного персонала группы А (атомной промышленности) за весь период профессиональной деятельности установлен одинаковый дозовый предел 1000 мЗв. А теперь обратимся к данным в строчках 2 и 3. При нормативе 20 мЗв в год в атомной промышленности можно отработать 50 лет, пока не наберется предельная доза за весь период трудовой деятельности. А вот для космонавта этот срок будет примерно 4.5 года. Но так долго у нас в космосе пока еще не летал ни один космонавт. Космические «долгожители» имеют налет в пределах 700–800 суток за несколько экспедиций, в которых они участвовали.

СРАВНЕНИЕ ДОЗ РАДИАЦИИ В РАЗНЫХ ОТСЕКАХ СТАНЦИИ И ВНУТРИ ТЕЛА КОСМОНАВТА

С учетом высоких уровней космической радиации необходимо определять индивидуальные дозы космонавтов за полет с максимально возможной точностью. Многократного запаса по дозе до разрешенного норматива, как это порой бывает в наземной практике обеспечения радиационной безопасности, для космоса нет. Когда-то, на заре эры пилотируемых полетов, на космическом корабле был всего один дозиметр, определявший дозу за весь период полета. На том этапе это было оправдано, так как и объем обитаемого отсека космического корабля был невелик, и длительности первых полетов были небольшими. Затем пришло время многомодульных космических станций, где измерения показали, что дозы радиации в разных модулях неодинаковые и могут различаться до полутора-двух раз при невозмущенных радиационных условиях, когда нет солнечных протонных событий (СПС). На космических станциях стали появляться системы из нескольких стационарных датчиков радиации, распределенных по разным отсекам, а для каждого космонавта по правилам полета обязательно предусматривается индивидуальный дозиметр, который в соответствии с бортовой инструкцией необходимо в течение всего полета носить в специальном кармане полетного костюма. С помощью носимого космонавтом индивидуального дозиметра можно определять его дозу (точнее дозу на поверхности тела) за весь полет.

Дальнейшие исследования показали, что внутри тела космонавта за счет «самоэкранированности» органов тела происходит дальнейшая трансформация дозового поля космической

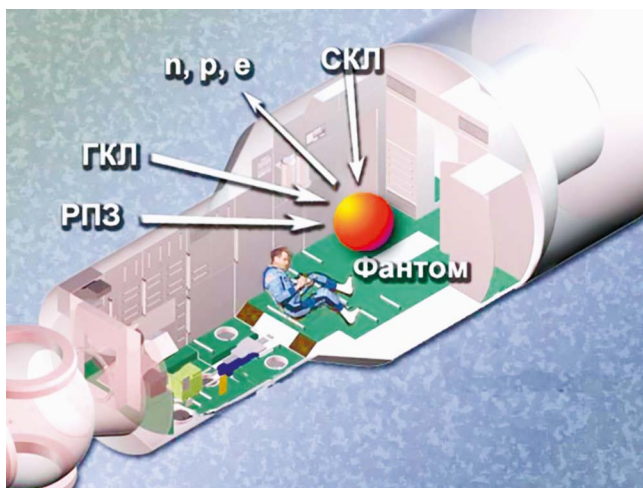
радиации, которая должна быть учтена для оценки доз на критические (наиболее чувствительные) для воздействия радиации органы. И это стало являться одним из требований нормативных документов. Так, строчка 8 таблицы дает разрешенные пределы доз на кровеносную систему (КТС) человека, которые будут отличаться от дозы на поверхность тела. Кроме этого, к критическим органам человека относят кожу (КЖ), хрусталик глаза (ХГ), половые железы – гонады (ГН), центральную нервную систему (ЦНС), желудочно-кишечный тракт (ЖКТ) и др.

Упомянутые органы имеют различную защиту самим веществом тела космонавта от воздействующей внешней радиации. С учетом характерных для источников космической радиации энергий потоков частиц внутри орбитальной станции ожидаемое уменьшение дозы в теле человека по отношению к дозе на поверхности тела, которую измеряет носимый индивидуальный дозиметр, может составить в спокойных радиационных условиях до 15% (для галактических КЛ) и от 15 до 50% (для протонов РПЗ). В возмущенных же радиационных условиях в зависимости от энергетических

характеристик потоков протонов, входящих от Солнца, перепад доз по телу космонавта может составить до нескольких раз! Дозы космической радиации достаточно значительны и в спокойных условиях. А как их измерить в критических органах, что особенно важно в случае возникновения повышенной радиационной опасности, когда, опираясь на имеющиеся дозовые нормативы, нужно оперативно принять решение о том, есть превышение нормативного уровня или нет? Другими словами, по критерию радиационной безопасности нужно решить: «полет может продолжаться по намеченной программе» или нужно принимать срочные меры по эвакуации экипажа с опасной орбиты.

Дозиметр, который находится на стенке отсека станции или в кармане у космонавта, дает только оценку дозы на поверхности тела. А как разместить дозиметры внутри тела космонавта, в местах расположения его критических органов? Вряд ли сами космонавты согласились бы на это. Решение такой задачи было найдено за счет использования специальных устройств, так называемых фантомов, внутрь которых и помещают датчики радиации.

На фантом, расположенный рядом с космонавтом, воздействуют те же источники космической радиации. Их вклад в дозу определяется датчиками внутри этого фантома. Источник: сайт NASA SRAG, русифицировано



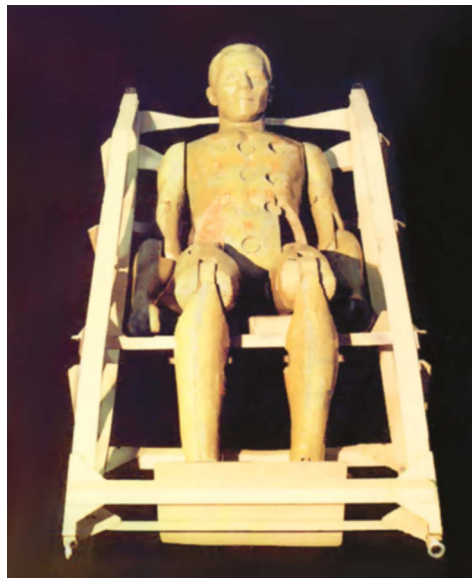
ФАНТОМЫ НА КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ: ХОРОШИЕ И РАЗНЫЕ

Идея использовать фантомы-манекены для определения доз радиации вместо измерения внутри тела космонавта возникла у ученых давно, но реализовать ее удалось не сразу. Радиация по-разному взаимодействует с разными веществами, поэтому фантом по своему химическому составу должен был как можно ближе соответствовать составу человеческого тела. А еще материал фантома должен быть не токсичен, не пожароопасен и устойчив ко всем воздействующим факторам космического полета – вибрации, перегрузкам и т.д.

Удобный случай представился в 1969 году, когда готовился облет Луны на беспилотном космическом аппарате «Зонд-7». Внутри этого аппарата было помещено кресло космонавта, а в кресло посажен антропоморфный (имитирующий тело человека) фантом, сделанный из смеси эпоксидной смолы и зерен пшеницы в специально подобранном соотношении.

Это был первый в мире облет Луны с использованием фантома с датчиками радиации. В результате были получены уникальные данные о распределении доз в теле космонавта при полете по трассе Земля–Луна–Земля. Специалисты пришли к неопровержимому выводу: «При невозмущенных радиационных условиях, когда отсутствуют СПС, полет человека на Луну и обратно по критерию радиационной опасности возможен», что бы ни говорили об этом скептики. Кроме того, было доказано практически, что фантом можно использовать в космических экспериментах.

Еще один уникальный эксперимент с фантомом был реализован на станции «Мир». На станцию была доставле-



Фантом из эпоксидной смолы, смешанной с зернами пшеницы.
Источник: Смиренный Л.Н., 2005

на сферическая оболочка из пластика, где были предусмотрены каналы для размещения дозиметров. В сложном виде эта оболочка была компактной и мало весила, а уже на станции космонавты наполнили ее водой через специальный клапан и вставили внутрь

Наполняемый водой сферический фантом на станции «Мир».
Фотография с борта станции «Мир».
Источник: ПАО «РКК «Энергия»

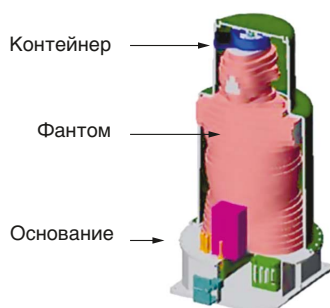
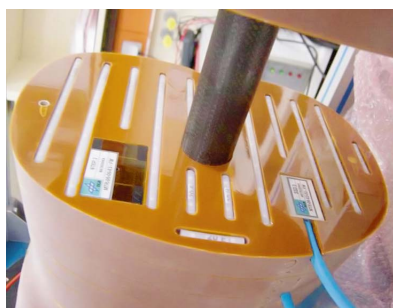


приборы. Тело человека на 70% состоит из воды, поэтому именно вода обеспечивала «тканезквивалентность» этого фантома.

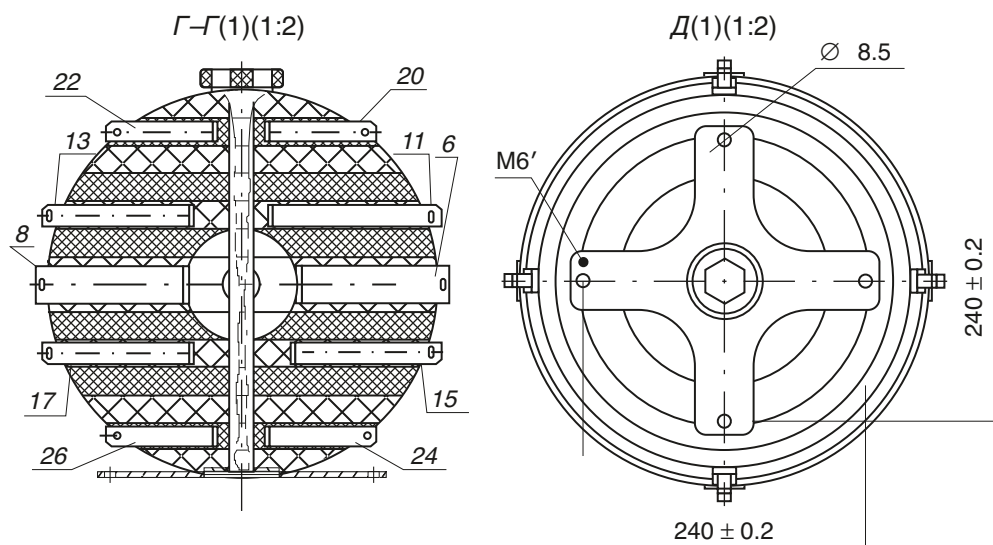
На этом история использования фантомов для измерения доз внутри тела космонавта не закончилась. Позже были полеты фантомов NASA на «Шаттлах». А в 2004 году на МКС начался совместный российско-европейский эксперимент «Матрёшка». В подготовке этого эксперимента непосредственное участие принимали специалисты Института медико-биологических проблем РАН и Института космической медицины из г. Кёльн (Германия). Антропоморфный фантом «Рэндо», моделирующий верхнюю часть тела человека, был выставлен на внешней поверхности МКС. Сверху он накрывался специальным контейнером из углепластика, имитирующим защиту скафандром. Фантом состоял из 34 слоев, внутрь которых было установлено около тысячи пассивных датчиков, которые регистрировали дозу, накопленную в течение всего периода эксперимента. Затем датчики спускались на Землю и отправлялись в лаборатории, где с них снимали показания. После экспонирования снаружи станции пассивные детекторы заменяли на новые и фантом «Рэндо» размещали в разных отсеках

МКС. Однако получить данные с активных датчиков, непрерывно регистрирующих изменение радиационных условий в полете, в эксперименте с фантомом «Рэндо» не удалось, эксперимент был завершен в 2009 году.

Одновременно с использованием фантома «Рэндо» в 2004 году начался космический эксперимент и с российским шаровым фантомом «Матрёшка-Р». Целью этого эксперимента как раз и было детальное изучение распределения дозовых нагрузок в теле космонавта в разных отсеках станции. Фантом был изготовлен из специально созданного тканезквивалентного полиуретанового материала, который был максимально близок по составу тканям тела человека и удовлетворял всем требованиям космического полета. Внутри фантома были предусмотрены отверстия для установки пеналов с дозиметрами. Всего предусматривалась возможность установки 20 пеналов разной длины и диаметра, где на разной глубине размещались пассивные дозиметры. Отверстия для «экваториальных» пеналов, а также дополнительный вертикальный канал позволяли в составе шарового фантома использовать датчики активной дозиметрической аппаратуры, получающей питание от бортовой сети. Поверхность фантома



Фантом «Рэндо» (слева); слои с датчиками (в центре); фантом в контейнере для установки снаружи МКС (справа). Источник: Reitz G. et al., 2009, русифицировано



Шаровой фантом в разрезе (вверху); Шаровой фантом с пенами (слева внизу); Шаровой фантом с надетым чехлом (справа внизу). Источник: Акатов Ю.А. и др., 2002

защищалась специальным чехлом из негорючего материала. На чехле имелись 32 кармана для размещения датчиков радиации на поверхности фантома, т.е. за минимальной толщиной защиты.

Шаровой фантом космического эксперимента «Матрёшка-Р», как и его прототип сферический фантом на станции «Мир», который наполнялся

водой, безусловно, в меньшей степени напоминают тело человека в сравнении с антропоморфными фантомами. Однако в данном случае «подобие образу» и не требуется: никто ведь не собирався, к примеру, демонстрировать модную одежду на шаровом фантоме, как на манекене. Тем не менее, благодаря специально подобранным размерам шара и сферической полости

внутри него ученым удалось получить надежные данные о дозовых нагрузках в критических органах человека, размещая датчики на определенной глубине внутри фантома. Разные глубины внутри шарового фантома соответствуют разным критическим органам тела человека, так как на этих глубинах реализуются те же условия самоэкранированности от космической радиации, что и в теле человека, а значит, и измеряемая доза будет та же самая! Например, кроветворной

системе соответствует глубина в фантоме 50 мм, а центральной нервной системе – уже 70 мм.

В таблице сопоставляются свойства российского шарового фантома «Матрёшка-Р» и антропоморфного европейского фантома «Рэндо».

Из сопоставления основных свойств фантомов, приведенного в таблице, следует, что российский шаровой фантом по сравнению с европейским антропоморфным имеет ряд преимуществ, основные из которых следующие.

Таблица 2

Сопоставление свойств российского шарового фантома «Матрёшка-Р» и антропоморфного европейского фантома «Рэндо»

Свойство	Европейский фантом «Рэндо»	Российский фантом «Матрёшка-Р»
Ткане-эквивалентный материал	Полиуретан	Полиуретан системы ТДИ, ближе по составу к тканям тела человека
Масса	Полное тело: 70 кг; торс с головой: около 60 кг	Фантом на подставке: около 32 кг, практически в 2 раза легче «Рэндо»
Габариты	Полное тело: высота 170 см; торс с головой: около 90 см	Диаметр 35 см. Более компактный, чем «Рэндо», возможно размещение в каюте вместе с космонавтом
Удобство работы для экипажа	Для замены детекторов требуется полная разборка, участвуют 2 члена экипажа, работают 4 часа	Для замены детекторов разборка не требуется. Справляется 1 член экипажа в течение получаса
Использование активных датчиков	Было предусмотрено, но не было реализовано в эксперименте	Впервые в мире были проведены измерения внутри фантома активными датчиками, в том числе в период СПС
Зависимость дозового распределения от ориентации	Разные дозовые распределения в зависимости от ориентации тела (лицом, спиной, боком к стенке каюты)	Нет требований к ориентации в месте размещения. Так как фантом круглый, то ему все равно, какой стороной он направлен к стенке
Учет пола членов экипажа	Фантом мужской. Для исследования распределения доз в органах женщины может потребоваться фантом женский.	Фантом сделан в стиле «уни-секс» и учитывает особенности обоих гендеров. Глубина залегания критических органов определяется расчетными методиками.



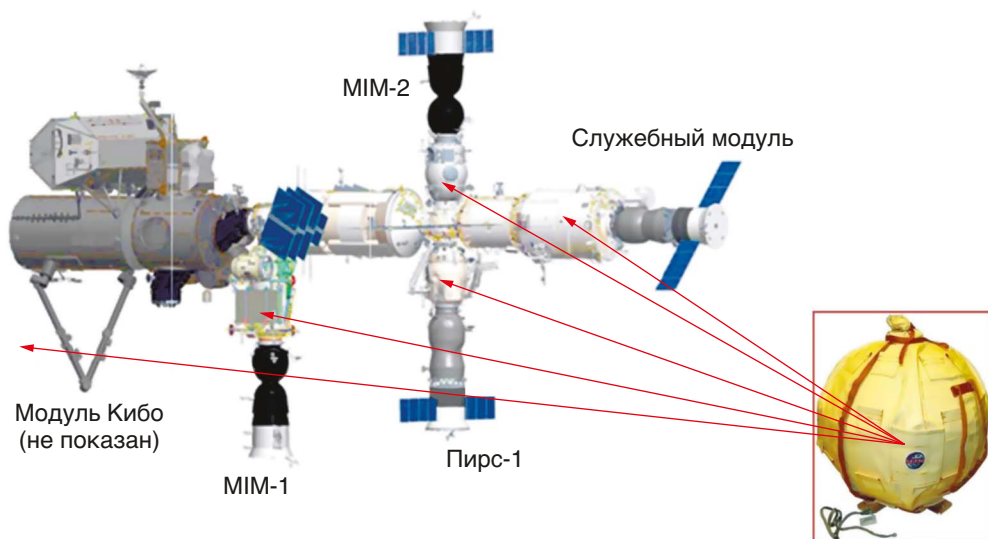
Шаровой фантом в чехле
в каюте космонавта, на снимке –
внизу слева. Фото с борта МКС.
Источник: ПАО «РКК «Энергия»

1) меньшие габариты и масса, что
весьма важно в практике пилотируе-
мых космических полетов;

2) не требует разборки для установ-
ки/изъятия датчиков при замене, что
экономит затраты времени космонав-
тов при проведении эксперимента;

3) тканезквивалентные свойства бли-
же к составу тела стандартного челове-
ка, чем у фантома «Рэндо».

В одной из сессий эксперимента ша-
ровой фантом «Матрёшка-Р» был по-
мещен в каюту космонавта в Служеб-
ном модуле, что при этом не лишило
возможности нахождения в каюте са-
мого космонавта. Полученные резуль-
таты показали более чем 2-х крат-
ное различие дозы в различных точ-
ках на поверхности фантома. При этом
наибольшая доза наблюдалась вбли-
зи внешней стенки отсека, а наимень-
шая – на диаметрально противополож-
ной стороне фантома. Следует также
полагать, что максимальная мощность
дозы, измеренная внутри фантома,
преимущественно обусловлена воз-
действием галактических КЛ и РПЗ,



Места размещения шарового фантома в модулях МКС. Рисунок В.А. Шуршакова

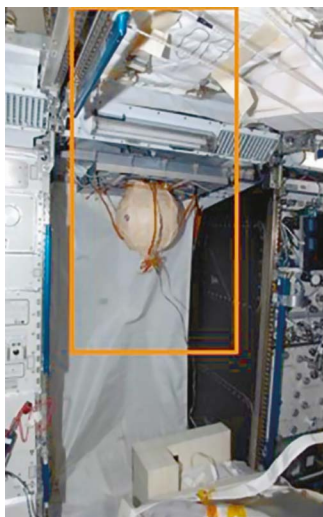
Размещение сферического и антропоморфного фантомов в одном и том же отсеке модуля «Кибо». Фото с борта МКС. Источник: ПАО «РКК «Энергия»

а минимальные величины доз вызваны в основном сильно проникающими частицами галактических КЛ и наблюдались за защитой 5 см тканезквивалентного вещества и более.

Для комплексного изучения дозовых нагрузок на организм космонавта шаровой фантом на различных этапах эксперимента последовательно помещался в разных модулях МКС.

В одной из сессий шаровой фантом был размещен в отсеке японского модуля «Кибо», в котором некоторое время до этого находился европейский фантом «Рэндо».

В результате этого эксперимента в очередной раз была подтверждена эквивалентность использования обоих типов фантомов для измерения доз в органах космонавта. Перепад доз по телу космонавта от поверхности тела к внутренним органам в обоих случаях оказался в пределах 1.4–1.7 раза в невозмущенных условиях. Полученные с использованием шарового фантома результаты по дозам в критических



органах хорошо согласуются с данными измерений с использованием антропоморфного фантома.

В ряде сессий в экваториальном канале шарового фантома размещался специально спроектированный для этого российскими и болгарскими учеными детекторный блок дозиметрической аппаратуры «Люлин-5» с тремя полупроводниковыми датчиками для одновременных измерений дозы на разных глубинах в фантоме.

Уникальные данные были получены на МКС прибором «Люлин-5» 7–8 марта 2012 года. Впервые в практике пилотируемых полетов проведены измерения динамики дозы космического излучения на разных глубинах в тканезквивалентном фантоме во время СПС,



Дозиметр «Люлин-5» в укладке (слева); детекторный блок дозиметра (в центре); детекторный блок внутри канала шарового фантома (справа). Фото авторов

произшедшего в этот период. Было зафиксировано возрастание мощности дозы и потока одновременно на 3-х глубинах в фантоме. Дополнительная доза на кроветворную систему от этого относительно маломощного СПС составила примерно половину суточной дозы, что было гораздо ниже дозовых пределов острого радиационного воздействия для космонавтов, более 150 суточных доз за СПС. При этом впервые была произведена оценки дозы непосредственно в критических органах космонавтов при наблюдаемых динамических изменениях радиационной обстановки.

ФАНТОМ-СВИДЕТЕЛЬ: ИНОГДА ОНИ ВОЗВРАЩАЮТСЯ

Российский тканеэквивалентный шаровой фантом, оснащенный пассивными и активными датчиками радиации, оказался фантомом-должителем, поскольку к настоящему моменту уже проработал на станции более 20 лет и стал свидетелем изменения радиационных нагрузок на космонавтов многих экспедиций в зависимости от места расположения отсека, высоты полета, солнечной активности и многих других факторов. Срок эксплуатации МКС подходит к концу, завершается и космический эксперимент с использованием российского фантома-свидетеля, но нельзя не отметить уникальность реализованного проекта. Фактически, впервые в истории космонавтики при помощи одного устройства были исследованы динамические воздействия всех источников ионизирующего космического излучения на организм космонавта в целом и отдельные органы, в частности за период, не только пре-

восходящий 11-летний цикл солнечной активности, но и запредельный на сегодняшний день период среди радиобиологических исследований с использованием фантомов.

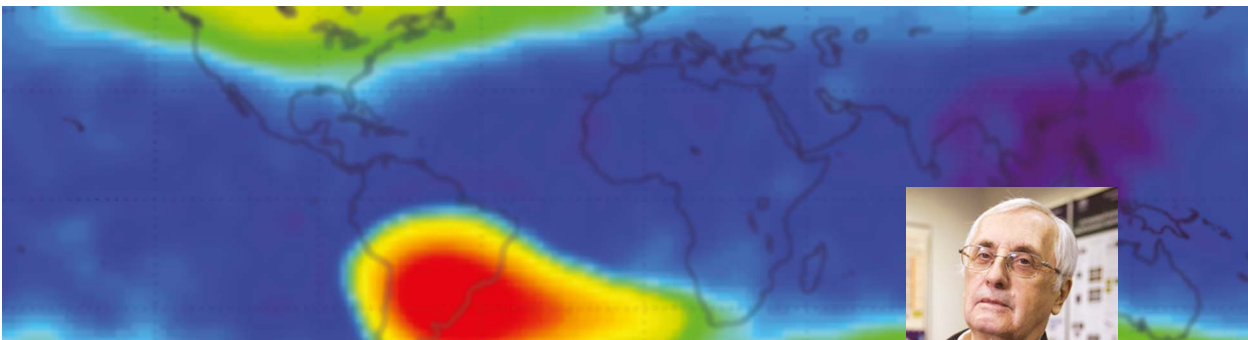
Что же дальше? Будет работать новая Российская орбитальная станция (РОС), трасса полета которой будет проходить через полярные области и поэтому будет существенно более радиационно-опасной по сравнению с ситуацией на МКС. С учетом полученных уникальных данных о дозах в отсеках МКС и в теле космонавтов специалисты Службы радиационной безопасности пилотируемых космических полетов Института медико-биологических проблем РАН предложили и обосновали необходимость использования нового шарового «фантома-свидетеля», но уже не в качестве научного прибора, а как штатного средства радиационного контроля в отсеках новой высокоширотной станции РОС, а это значит, что возвращение нашего фантома к космической деятельности обязательно состоится!

В заключение хотелось бы отметить, что представленные результаты были во многом получены благодаря помощи и поддержке наших коллег из российской космической отрасли, а также при широкой международной кооперации с космическими организациями и учеными Болгарии, Венгрии, Германии, Канады, США, Японии и других стран.

Литература

1. Панасюк М.И. Радиоактивная Вселенная. Фрязино: Век 2, 2019. 272 с.
2. Егоров Виталий. Люди на Луне: главные ответы. М.: Альпина нон-фикшн, 2020. 432 с.
3. Ушаков И.Б. Космос. Радиация. Человек (Радиационный барьер в межпланетных полетах). М.: Научная книга, 2021. 352 с.

ЭКСПЕРИМЕНТ «БТН-НЕЙТРОН»: ИЗУЧЕНИЕ РАДИАЦИОННОГО ФОНА НА БОРТУ МКС И РОС



МИТРОФАНОВ Игорь Георгиевич,

доктор физико-математических наук

ЛИТВАК Максим Леонидович,

*доктор физико-математических наук,
профессор РАН*

ГОЛОВИН Дмитрий Васильевич

КОЗЫРЕВ Александр Сергеевич,

кандидат физико-математических наук

МОКРОУСОВ Максим Игоревич,

кандидат физико-математических наук

ПЕКОВ Алексей Николаевич

ТРЕТЬЯКОВ Владислав Иванович

Институт космических исследований РАН

DOI: 10.7868/50044394824020051



Радиационный фон на борту космической станции на орбите вокруг Земли представляет собой как космическое излучение, проникающее из межпланетной среды, так и вторичное излучение, возникающее в результате взаимодействия потоков заряженных частиц высоких энергий с верхней



атмосферой Земли и материалами орбитальной станции. Поэтому, наблюдая за радиационным фоном на околоземной орбите, можно одновременно изучать фундаментальную физику и решать важные практические задачи. В частности, измерения нейтронного фона на земной орбите позволяют оценить вклад нейтронов в полную дозу радиации и предложить эффективную радиационную защиту экипажа и аппаратуры на орбите Земли (орбитальные станции МКС или РОС) или во время длительного межпланетного полета.

Нейтроны обладают большой проникающей способностью и имеют очень высокий фактор вреда для организма, зависящий от энергии нейтрона, по сравнению с остальными видами излучения. Чем выше энергия – тем больше радиационное поражение организма. Наибольший вред приносят быстрые нейтроны с энергией более 1 мегаэлектронвольта (МэВ). Известно, что для небольших космических аппаратов основной вклад в радиационную дозу вносят первичные заряженные частицы, а нейтроны составляют лишь небольшую долю ~ 1–5%¹. Для пилотируемых космических станций, где из-за большой массы станции происходит эффективная конвертация налетающего потока заряженных частиц в высокий нейтронный и гамма-фон, это соотношение существенно возрастает².

¹ См., например, *Kohler J. et al. Measurements of the neutron spectrum in transit to Mars on the Mars science laboratory // Life Sci. Space Res. V. 5. P. 6–12 (2015): <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2015.03.001>; Litvak M.L. et al. Observations of neutron radiation environment during Odyssey cruise to Mars // Life Sci. Space Res. V. 29. P. 53–62 (2021): <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.03.003>*

² *Shurshakov V.A. et al. Evaluation of the spectrometric and dose characteristics of neutron fields inside the Russian segment of the ISS by fission detectors // Cosmic. Res. V. 54. P. 111–117 (2016); Zeitlin C. et al. Results from the Radiation*

За время работы Международной космической станции был проведен ряд различных экспериментов и численных расчетов, которые показали, что вклад нейтронной компоненты в полную радиационную дозу может составлять десятки процентов, а характерная средняя мощность эффективной нейтронной дозы во всем диапазоне энергий может достигать 5–10 мкЗв/ч³. Это величину следует сравнить со допустимым радиационным фоном для населения на поверхности Земли, который согласно нормам радиационной безопасности составляет не более 0.5 мкЗв/ч.

Данная статья посвящена описанию эксперимента «БТН-нейтрон» – истории его создания, полученным результатам и планам будущих исследований.

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «БТН-НЕЙТРОН»

Радиационный фон на борту МКС меняется как пространстве вдоль орбиты станции, так и во времени. Существенное влияние на пространственную переменность оказывает магнитное поле Земли. В окрестности магнитных полюсов Земли и при пролете Южно-атлантической магнитной аномалии (ЮАМА), где нижняя граница внутреннего радиационного пояса с захваченными протонами опускается до высоты около 200 км, существенно возрастает поток заряженных частиц, а вместе с ним и вторичное нейтронное и гамма-излучение. Изменение фона на борту МКС со временем связано с вариациями ГКЛ, солнечной

Assessment Detector on the International Space Station: Part 3, combined results from the CPD and FND // Life Sci. Space Res. V. 39. P. 86–94 (2023): <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2023.06.002>

³ Там же.

активностью, вспышками гамма-лучей в земной атмосфере и космическими гамма-всплесками.

Учитывая эти особенности фона, были сформулированы следующие научные задачи космического эксперимента (КЭ) «БТН-Нейтрон»:

1) Непрерывное наблюдение за переменностью нейтронного потока на МКС в широком спектральном диапазоне от надтепловых до быстрых нейтронов. Эта задача включает изучение вариаций нейтронного потока на разных временных масштабах, начиная от орбитальной переменности и заканчивая долгопериодическими изменениями, связанными с одиннадцатилетним солнечным циклом.

2) Изучение пространственной переменности потоков нейтронного и гамма-излучения при пролете МКС над разными участками земной поверхности, включая пролеты над экваториальными районами, ЮАМА и на высоких геомагнитных широтах. Построение глобальных карт в полосе широт орбиты МКС распределения нейтронного потока за разные промежутки времени.

3) Мониторинг потоков нейтронов и гамма-лучей во время сильных солнечных протонных событий и солнечных вспышек, поиск и регистрация солнечных нейтронов.

4) Измерение мощности нейтронной компоненты радиационной дозы снаружи МКС, сопоставление этой величины с полной радиационной дозой на борту МКС, построение глобальной карты нейтронной компоненты радиационной дозы и изучение ее переменности во времени.

5) Регистрация и каталогизация солнечных вспышек, солнечных протонных событий, и космических гамма-всплесков.

6) Изучение средств защиты от нейтронной компоненты радиации на борту космических аппаратов.

ПЕРВЫЙ ЭТАП ЭКСПЕРИМЕНТА «БТН-НЕЙТРОН»: БТН-М1

Эксперимент «БТН-Нейтрон» был задуман и предложен в 1997 г. И.Г. Митрофановым, В.И. Лягушиным и М.А. Прониным для установки на борт Российского сегмента (РС) МКС для измерения потоков нейтронов в широком диапазоне энергий, начиная от тепловых нейтронов (малые доли эВ) и до быстрых нейтронов с энергиями порядка 10 МэВ⁴. Впоследствии исходную концепцию эксперимента существенно оптимизировали с учетом задела, образовавшегося в 2002 г., после запуска американской межпланетной станции «Марс-Одиссей» (*Mars Odyssey*, NASA) к Марсу. В состав этой станции вошел нейтронный спектрометр ХЕНД (HEND, сокращение от High Energy Neutron Detector), разработанный в ИКИ РАН, для глобального картографирования нейтронного альbedo Марса в разных энергетических диапазонах с целью поиска районов с высоким содержанием воды в подповерхностном слое вещества⁵ (рис. 1).

Учитывая, что на Земле остался запасной штатный образец прибора, было решено использовать его в качестве детекторного блока для проведения первого этапа КЭ «БТН-Нейтрон». Для этого был разработан новый блок электроники БТН-МЭ (рис. 2) для взаимодействия с системами энергетики и те-

⁴ Третьяков В.И. и др. Первый этап космического эксперимента «БТН-Нейтрон» на борту российского сегмента Международной космической станции // Космич. исслед. 2010. Т. 48. № 6. С. 293–307.

⁵ Mitrofanov I.G. et al. Maps of subsurface hydrogen from High Energy Neutron Detector // Science. 2002. V. 297. P. 78–81; Mitrofanov I.G. et al. Search for Water in Martian Soil Using Global Neutron Mapping by the Russian HEND Instrument Onboard the US2001 Mars Odyssey Spacecraft. Solar System Research. 2003. V. 37. P. 366–377.

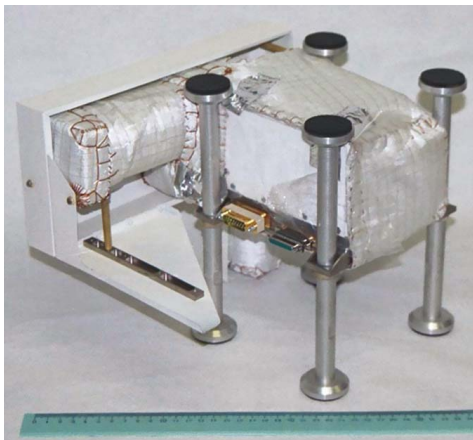


Рис. 1. Прибор ХЕНД на лабораторном столе в ИКИ РАН. Фотография ИКИ РАН

леметрии МКС и блок БТН-МД (рис. 3), включающий запасной образец прибора ХЕНД и систему обеспечения теплового регулирования детекторной частью вне гермоотсека. В результате возникла научная аппаратура

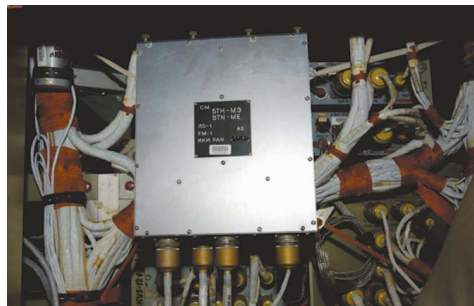


Рис. 2. Блок электроники БТН-БЭ в гермоотсеке модуля «Звезда»

БТН-М1⁶. В конце 2006 г. космонавт РФ Михаил Тюрин и астронавт США Майкл Лопес-Алегрия установили ее в гермоотсеке и на специальном кронштейне

⁶ Третьяков В.И. и др. Первый этап космического эксперимента «БТН-Нейтрон» на борту российского сегмента Международной космической станции // Космич. исслед. 2010. Т. 48. № 6. С. 293–307.

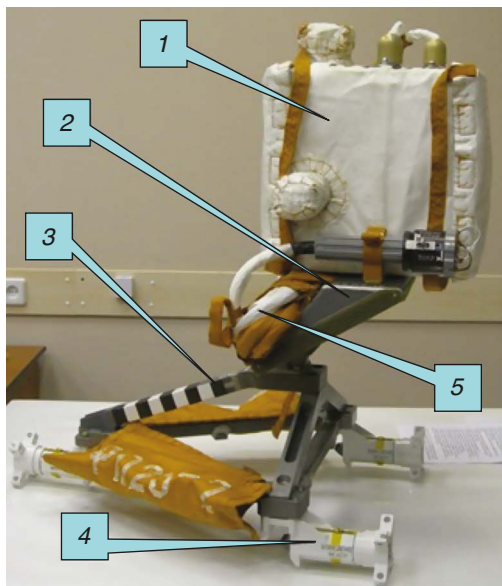


Рис. 3. Фото внешнего детекторного блока научной аппаратуры БТН-М1 в сборе перед отправкой на МКС: 1 – детекторный блок, 2 – ферма, 3 – кронштейн, 4 – быстросъемные замки, 5 – кабели, 6 – временный защитный чехол. Фотография ИКИ РАН

на внешней поверхности российского модуля «Звезда» (см. рис. 4).

Использованный в составе блока БТН-МД запасной образец марсианского прибора ХЕНД представляет собой компактный нейтронный и гамма-спектрометр, в состав которого вошли несколько различных детекторов нейтронного и гамма-излучения. Регистрация потока нейтронов реализована с помощью трех пропорциональных счетчиков на основе ^3He , окруженных экранами из кадмия и замедлителем из полиэтилена разной толщины, отвечающих за диапазон энергий от надтепловых (0.4 эВ) до быстрых нейтронов (1 МэВ) и нейтронного сцинтиллятора быстрых нейтронов (с энергией больше 0.4 МэВ) на основе кристалла стильбена $\text{C}_{14}\text{H}_{12}$.

За счет реакции захвата теплового и эпитеплового нейтрона пропорциональный счетчик является эффективным детектором нейтронов с энергиями до нескольких сотен электронвольт. Оболочка из кадмия поглощает тепловые нейтроны с энергиями ниже 0.4 эВ. Полиэтилен (CH_2) за счет наличия водорода является эффективным замедлителем нейтронов высоких энергий. Поэтому увеличивая толщину полиэтиленовой оболочки можно существенно повысить эффективность регистрации быстрых нейтронов.

Быстрые нейтроны в кристалле стильбена регистрируются по протонам отдачи. Поскольку сцинтилляторы регистрируют заряженные частицы и гамма-фотоны, для выделения нейтронного сигнала используется разделение по форме импульсов от протонов отдачи (нейтронный сигнал) и электронов (гамма-сигнал). Кроме этого, стильбен окружен активной антисовпадательной защитой из кристалла $\text{CsI} : \text{Tl}^{3+}$, чтобы обеспечить защиту от заряженных частиц ГКЛ.



Рис. 4. Астронавт NASA Майкл Лопес-Алегрия устанавливает научную аппаратуру БТН-М1 на внешней поверхности российского модуля «Звезда». Фотография NASA / SCIENCE PHOTO LIBRARY, 2007 г.

Предложенная комбинация детекторов позволяет регистрировать нейтроны с энергиями в диапазоне 0.4 эВ – 15 МэВ и гамма-кванты в диапазоне 60 кэВ – 2 МэВ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ «БТН-М1»

Научная аппаратура БТН-М1 работает практически непрерывно уже более 17 лет. Локальные перерывы в работе были связаны с проблемами в работе служебной аппаратуры МКС, которые в итоге удалось успешно преодолеть. Поэтому к наиболее важным результатам эксперимента относится анализ многолетних наблюдений, показывающих, как менялся нейтронный фон в окрестности МКС в течение нескольких солнечных циклов. Это включает наблюдения за концом 23 солнечного цикла (до декабря 2008 г.), полным 24 солнечным циклом и началом 25 солнечного цикла (с декабря 2019).

Данные, полученные с помощью научной аппаратуры БТН-М1, показали, что распределение нейтронного потока

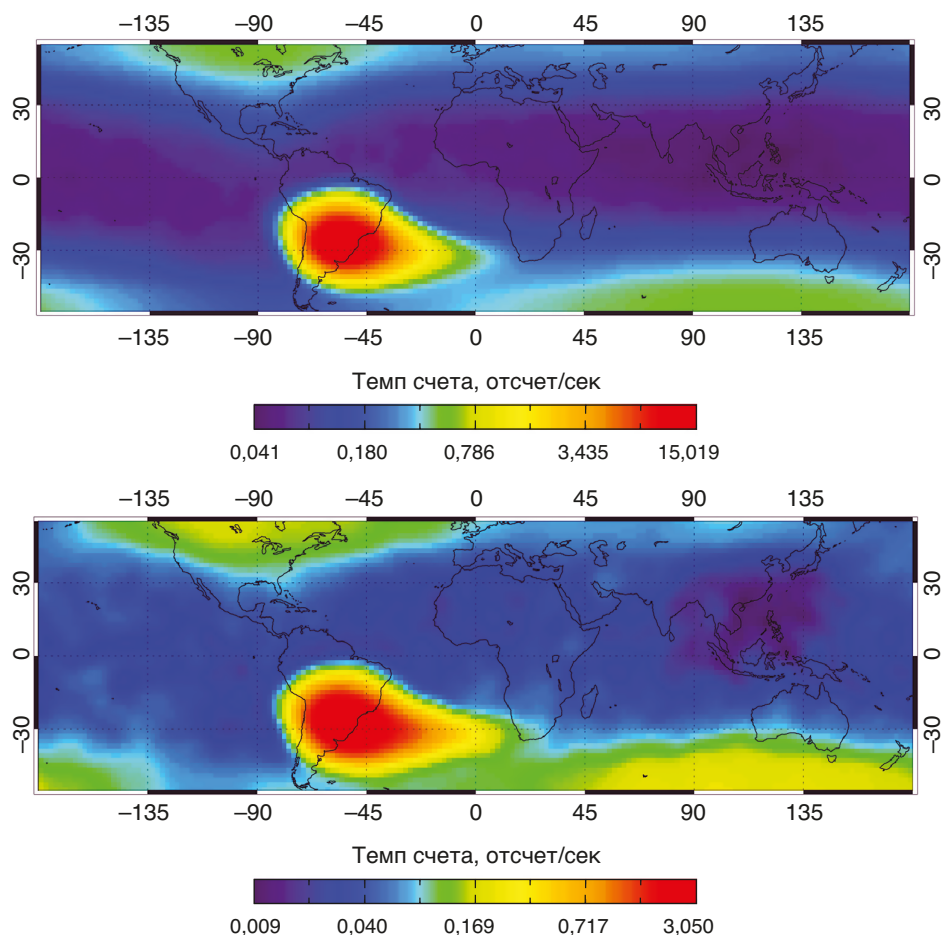


Рис. 5. Примеры глобальных карт надтепловых (внизу) и быстрых (вверху) нейтронов, построенных по данным научной аппаратуры БТН-М1. Изображение ИКИ РАН

сильно неоднородно в пространстве и существенно зависит от того, над какими областями пролетает в данный момент МКС в ходе своего орбитального движения⁷. Можно выделить несколько областей, где поток нейтронов меняется на порядки по своей величине. Причем эта переменность непосредствен-

⁷ Литвак М.Л. и др. Наблюдение пространственных и временных вариаций спектральной плотности нейтронного потока вне российского сегмента Международной космической станции по данным космического эксперимента «БТН-Нейтрон» // Космич. иссл. 2017. Т. 55. № 2. С. 116–130.

но зависит от конфигурации магнитного поля Земли. Для этого даже вводится специальный параметр – жесткость геомагнитного обрезания (ЖГО), который характеризует возможность проникновения космических заряженных частиц в магнитосферу и атмосферу Земли⁸. Над экваториальными районами этот параметр достигает больших значений 10–20 ГВ, так как заря-

⁸ См., например, Gerontidou M. et al. World grid of cosmic ray vertical cut-off rigidity for the last decade // Advances in Space Research. 2021. V. 67. P. 2231–2240.

женные частицы низких энергий здесь эффективно отклоняются магнитным полем, что в свою очередь приводит к низким значениям интенсивности нейтронного потока. На высоких широтах, в окрестности магнитных полюсов, ЖГО уменьшается до из-за дипольной конфигурации магнитного поля Земли. Заряженные частицы, составляющие низкоэнергетичную часть спектра ГКЛ, двигаясь вдоль силовых линий, могут проникать на высоты, где летает МКС. Из-за этого соответственно возрастает и поток вторичного нейтронного и гамма-излучения. Наконец, максимальные значения интенсивности нейтронного потока наблюдаются в области ЮАМА. Здесь напряженность магнитного поля Земли падает до минимальных значений (параметр ЖГО минимален), а внутренний радиационный пояс с захваченными заряженными частицами опускается до высот всего в 200 км. Внутренний радиационный пояс населен большим количеством протонов с энергиями > 100 МэВ, что достаточно для производства вторичных нейтронов в обшивке МКС при ее пролете через ЮАМА. Поэтому интенсивность потока нейтронов над этой областью в 10 раз превышает значения, которые наблюдаются на высоких геомагнитных широтах, и в 100 раз – данные измерений над экваториальными районами с высоким показателем жесткости геомагнитного обрезания. На рис. 5 показаны примеры карт нейтронного потока, построенных по данным научной аппаратуры БТН-М1, на которых хорошо видны эти области.

На рис. 6 (верхний график) показан многолетний временной профиль темпа счета нейтронов при пролетах в окрестности магнитных полюсов Земли. Поток заряженных частиц ГКЛ и вторичных нейтронов в этой области больше всего меняется из-за солнечной модуляции, а значит, длительное наблюдение за величиной нейтронного

потока при пролете этих областей дает возможность изучать долгопериодические вариации ГКЛ и понимать, как они влияют на поток вторичных частиц, рожденных в верхней атмосфере Земли и конструкции самой орбитальной станции.

Продолжительные многолетние измерения аппаратурой БТН-М1 (рис. 6) показали, что измеряемый сигнал испытывает очень большие периодические вариации с амплитудой до 2 раз от минимума до максимума⁹. Это хорошо соотносится с фазами активности Солнца внутри 11-летнего солнечного цикла. Для иллюстрации на нижнем графике (рис. 6) показано, как меняется количество солнечных пятен (число Вольфа). В начале и конце цикла солнечная активность минимальна, поэтому в эти периоды поток ГКЛ внутри Солнечной системы достигает наибольших значений, одновременно приводя к увеличению потока вторичных нейтронов. В середине цикла солнечная активность достигает максимума, а поток ГКЛ и вторичных нейтронов соответственно падает до минимальных значений.

За весь период наблюдений работы научной аппаратуры БТН-М1 было зарегистрировано два максимума потока нейтронов: с сентября 2009 г. по апрель 2010 г. и с августа 2018 г. по август 2021 г. Кроме этого, на временном профиле хорошо виден минимум нейтронного потока в конце 2014, начале 2015 гг. и приближение к второму минимуму в 2023 г.

Для мониторинга потока ГКЛ на Земле создана целая сеть нейтронных мониторов. На рис. 6 (средний

⁹ Литвак М.Л. и др. Долгопериодические вариации нейтронной компоненты радиационного фона в окрестности международной космической станции по данным космического эксперимента «БТН-Нейтрон» // Космич. ис-след. 2022. Т. 60. № 3. С. 206–217.

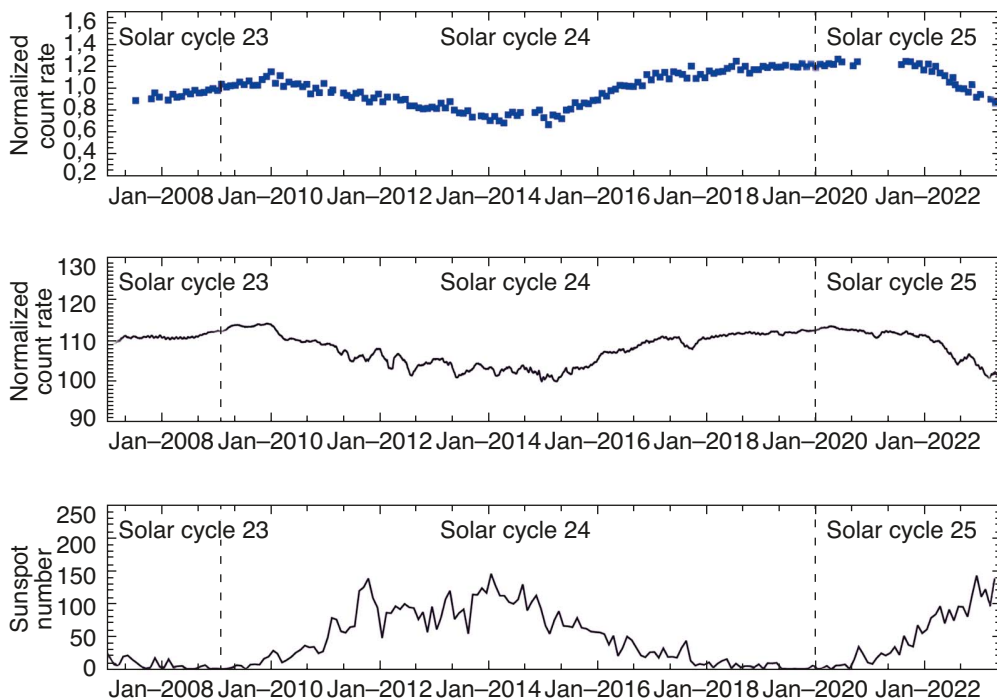


Рис. 6. Временные профили нейтронного потока по данным эксперимента БТН-Нейтрон (синий цвет, верхний график), наземного нейтронного монитора Oulu (средний график) и солнечных пятен (нижний график). Пунктирные линии показывают границы солнечных циклов. Изображение ИКИ РАН

график) для сравнения также показан профиль нейтронного потока, зарегистрированный одним из наземных нейтронных мониторов, находящимся в университете Оулу, Финляндия (см., <https://www.nmdb.eu/station/oulu/>). Хорошо видно, что в части крупномасштабной переменности орбитальный и наземный нейтронные мониторы хорошо повторяют друг друга. Таким образом, у ученых есть возможность наблюдать за поведением ГКЛ в окрестности Земли, сравнивая временные профили, зарегистрированные и на поверхности, и на околоземной орбите.

По данным многолетнего мониторинга нейтронного фона аппаратурой БТН-M1 (рис. 6) можно сделать несколько важных выводов, анализируя временную переменность нейтронного фона:

- 1) нейтронный сигнал инерционен и существенно запаздывает по сравнению с динамикой солнечной пятен (задержка от нескольких месяцев до года);
- 2) видны различия в мелкомасштабной переменности появления солнечных пятен и переменности нейтронного потока на орбите и на поверхности;
- 3) солнечные циклы, даже идущие непосредственно друг за другом, могут очень сильно отличаться, что подчеркивает важность многолетних непрерывных наблюдений, позволяющих сравнивать разные солнечные циклы между собой.

Еще один важный результат эксперимента БТН-M1 связан с восстановлением спектральной плотности нейтронного потока и переходом к оценке эффективной нейтронной дозы

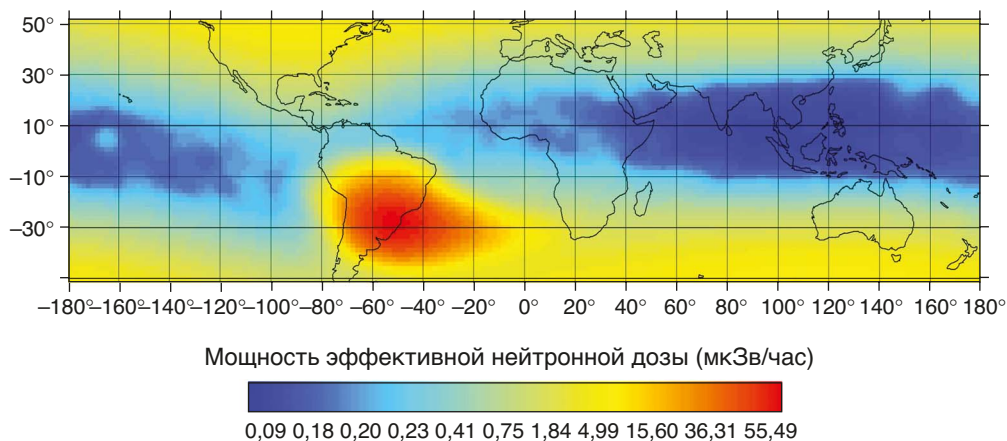


Рис. 7. Карта мощности эффективной дозы по нейтронам, полученная по данным научной аппаратуры БТН-М1 для минимума солнечного цикла (период с октября 2019 по апрель 2020 г.). Изображение ИКИ РАН

Таблица 1

Оценки мощности нейтронной компоненты радиационной дозы для минимума и максимума солнечной активности (25 солнечный цикл, периоды 10/2019–04/2020 и 04/2023–09/2023) при пролете МКС над различными областями

Область на карте	[октябрь 2019 – апрель 2020] Доза (мкЗв/час)	[апрель 2023 – сентябрь 2023] Доза (мкЗв/час)
Экваториальная	0.206 ± 0.002	0.211 ± 0.002
Северная приполярная	2.17 ± 0.02	1.33 ± 0.02
Южная приполярная	2.30 ± 0.02	1.47 ± 0.02
ЮАМА	28.9 ± 1.0	20.9 ± 1.0

в окрестности МКС для разных периодов времени и пролетов над разными участками поверхности¹⁰. В качестве иллюстрации на рис. 7 представлена карта мощности эффективной дозы

¹⁰ Литвак М.Л., Митрофанов И.Г., Головин Д.В., Пеков А., Мокроусов М.И., Санин А.Б., Третьяков В.И., Дачев Ц.П., Семкова Й.В. Долгопериодические вариации нейтронной компоненты радиационного фона в окрестности международной космической станции по данным космического эксперимента «БТН-Нейтрон» // Космич. исслед. 2022. Т. 60. № 3. С. 206–217.

для нейтронов, построенная за период минимума солнечной активности (2019–2020 гг.) и поэтому соответствующая максимуму нейтронного потока (т.е. максимальной дозе от нейтронов). В табл. 1 также приведены средние значения нейтронной компоненты радиационной дозы, полученные для различных областей для периодов в окрестности максимума (апрель–сентябрь 2023 г.) и минимума (октябрь 2019 – апрель 2020 гг.) солнечной активности в ходе 25 солнечного цикла.

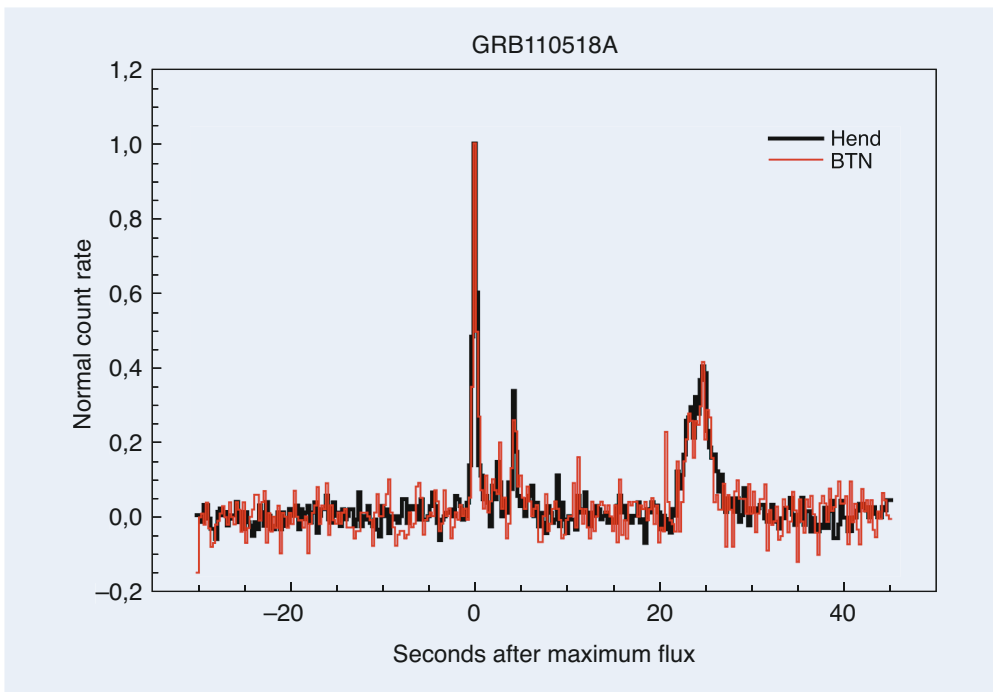


Рис. 8. Профили гамма-всплеска GRB110518A зарегистрированные научной аппаратурой ХЕНД (черная кривая) и БТН-М1 (красная кривая). Изображение ИКИ РАН

Из рис. 7 и табл. 1 следует, что максимальные значения эффективной нейтронной дозы фиксируются при пролете над ЮАМА (в 100 раз выше, чем на экваторе) и в высокоширотных областях, представляющих собой окрестность магнитных полюсов Земли (в 10 раз выше чем на экваторе).

В список научных задач эксперимента «БТН-Нейтрон» входит регистрация и каталогизация гамма-всплесков. Особый интерес представляют одновременные наблюдения событий на земной орбите и около Марса, что в том числе позволяет улучшить локализацию гамма-всплеска за счет триангуляции. На рис. 8 представлен пример таких наблюдений, где показаны временные профили одного и того же гамма-всплеска, зарегистрированные приборами ХЕНД и БТН-М1.

БЛИЖАЙШЕЕ БУДУЩЕЕ ЭКСПЕРИМЕНТА «БТН-НЕЙТРОН»: СОЗДАНИЕ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ БТН-М2

Анализ результатов, полученных с помощью научной аппаратуры БТН-М1, показал, что эксперимент «БТН-Нейтрон» существенно выиграет в научном плане, если на борту МКС появится аппаратура, установленная вне и внутри гермоотсека¹¹. Поэтому эксперимент «БТН-Нейтрон» на борту МКС было решено продолжить и создать дополни-

¹¹ Мокроусов М.И. и др. Второй этап космического эксперимента «БТН-Нейтрон» на борту российского сегмента международной космической станции: аппаратура БТН-М2 // Космич. исслед. 2022. Т. 60. № 5. С. 426–436.

тельную научную аппаратуру, которая получила название БТН-М2. В результате в текущих научных задачах эксперимента появилось два новых направления по отношению к БТН-М1.

Во-первых, было предложено исследовать различные средства защиты от вторичной нейтронной радиации на борту космического аппарата.

Во-вторых, добавилась возможность регистрации земных гамма-вспышек, возникающих в верхних слоях атмосферы Земли.

Создание и тестирование различных средств радиационной защиты является одним из востребованных направлений космической науки, в рамках которого изучается, с помощью каких методов можно обеспечить длительное пребывание космонавтов на будущих лунных базах или в ходе длительного космического перелета (например, к Марсу).

Изучение земных гамма-вспышек – это также молодая и динамично развивающаяся область космических исследований. Считается, что гамма-излучение во время земных гамма-вспышек возникает за счет тормозного излучения релятивистских электронов, которые ускоряются в сильном электрическом поле от разряда, созданного молнией¹². Энергия фотонов может достигать 20 МэВ, а характерная длительность составляет несколько миллисекунд, поэтому при разработке электроники аппаратуры БТН-М2 было заложено пофотонная регистрация гамма-лучей с очень высоким временным разрешением¹³.

В качестве прототипа детекторной части БТН-М2 был использован нейтронный и гамма-спектрометр МГНС,

созданный для меркурианской миссии Европейского космического агентства «БепиКоломбо», которая находится на пути к Меркурию и должна выйти на орбиту вокруг Меркурия в 2025 г.¹⁴ Для БТН-М2 выбранный прототип был доработан в части использования электроники с быстрой обработкой сигнала, чтобы регистрировать такие короткие события, как земные гамма-вспышки. Кроме этого, детекторный блок помещен внутрь специальной конструкции, на которую устанавливаются съемные двухслойные защитные экраны от нейтронного излучения. В их состав входят полиэтилен (как замедлитель быстрых нейтронов) и изотоп бора ^{10}B (эффективный поглотитель тепловых нейтронов). Такой подход использует разработки, апробированные в ходе российских экспериментов ЛЕНД и ФРЕНД, проводящихся сейчас на орбите Луны и Марса¹⁵. Общий вид БТН-М2 показан на рис. 9, а внутренний детекторный

¹⁴ Mitrofanov I.G. et al. The Mercury Gamma and Neutron Spectrometer (MGNS) onboard the Planetary Orbiter of the BepiColombo mission // *Planetary and Space Science*. 2010. V. 58. P. 116–124; Mitrofanov I.G. et al. The Mercury Gamma-Ray and Neutron Spectrometer (MGNS) Onboard the Mercury Planetary Orbiter of the BepiColombo Mission: Design Updates and First Measurements in Space // *Space Science Reviews*. V. 217. article id.67 (2021).

¹⁵ Mitrofanov I.G. et al. Experiment LEND of the NASA lunar reconnaissance orbiter for high-resolution mapping of neutron emission of the moon // *Astrobiology* V.8. N.4. (2008): <https://doi.org/10.1089/ast.2007.0158>; Mitrofanov I.G. et al. The Mercury Gamma-Ray and Neutron Spectrometer (MGNS) Onboard the Mercury Planetary Orbiter of the BepiColombo Mission: Design Updates and First Measurements in Space // *Space Science Reviews*. V. 217. article id.67 (2021); Mitrofanov I., Malakhov A., Bakhtin B., Golovin D., Kozlyev A., Litvak M., Mokrousov M., Sanin A., Tretyakov V., Vostrukhin A., Anikin A., Zelenyi L. M., Semkova J., Malchev S., Tomov B., Matviichuk Y., Dimitrov P., Koleva R., Dachev T., Krastev K., Shvetsov V., Timoshenko G., Bobrovitsky Y., Tomilina T., Benghin V., Shurshakov V. Fine resolution epithermal neutron detector (FRENDO) onboard the ExoMars trace gas orbiter // *Space Sci. Rev.* V. 214. article number 86 (2018): <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0522-5>

¹² Fishman G. et al. Discovery of Intense Gamma-Ray Flashes of Atmospheric Origin // *Science*. 1994. V. 264. P. 1313–1316; Smith D.M. et al. Terrestrial Gamma-Ray Flashes Observed up to 20 MeV // *Science*. 2005. V. 307. P. 1085–1088.

¹³ Мокроусов М.И. и др. Второй этап космического эксперимента «БТН-Нейтрон» на борту российского сегмента международной космической станции: аппаратура БТН-М2 // *Космич. исслед.* 2022. Т. 60. № 5. С. 426–436.



Рис. 9. Общий вид научной аппаратуры БТН-М2. Изображение ИКИ РАН

блок – на рис. 10. В ходе эксперимента экраны будут сниматься для формирования различных конфигураций регистрации локального фона. Это позволит определить степень анизотропии потока нейтронов и также оценить эффективность радиационной защиты от этих частиц.

Важной отличительной особенностью детекторного блока является гамма-спектрометр на основе большого кристалла бромида церия (CeBr_3) с размерами 3×3 дюйма и спектральным разрешением на уровне 4% на энергии 662 кэВ (ядерная линия гамма-излучения от реперного источника ^{137}Cs). Его мертвое время (с учетом аналоговой и цифровой электроники) составляет менее 4 мкс, а регистрация гамма-излучения происходит в диапазоне от 0.4 до 10 Мэ В.

К настоящему времени (май 2024 г.) создан штатный образец научной аппаратуры БТН-М2, который прошел все наземные испытания, включая физические калибровки, проведенные в Объединенном институте ядерных



Рис. 10. Детекторная часть научной аппаратуры БТН-М2. Изображение ИКИ РАН

исследований (г. Дубна). Его отправка на борт МКС запланирована на конец 2024 г.

ПРОДОЛЖЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА «БТН-НЕЙТРОН» НА ПЕРСПЕКТИВНОЙ РОССИЙСКОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ РОС

В настоящее время активно развивается национальный проект по созданию российской орбитальной станции (РОС)¹⁶. Она будет обращаться вокруг Земли по солнечно-синхронной орбите с наклоном 96.8° , что позволит пролетать над всей территорией нашей страны и в том числе изучать Арктику. Используя результаты и наработки эксперимента «БТН-Нейтрон» на МКС для российской станции РОС был предложен новый эксперимент «БТН-РОС»¹⁷, в рамках которого будут проводиться

¹⁶ См. <https://www.energia.ru/ru/spaceactivities/ros-station.html>

¹⁷ Мокроусов М.И. и др. Второй этап космического эксперимента «БТН-нейтрон» на борту российского сегмента международной космической станции: научная аппаратура БТН-М2 // Наука на МКС: Третья международная конференция, посвящённая 25-летию Международной космической станции: сб. тез. докл. ISBN 978-5-00015-063-4 DOI: 10.21046/ISS-2023

«БТН-М1»: начало в 2007



Нейтронные и гамма детекторы установлены снаружи гермоотсека МКС

«БТН-М2»: начало в 2024



Нейтронные и гамма детекторы со съёмными экранами установлены внутри гермоотсека МКС

«БТН-РОС»



Нейтронные и гамма детекторы установлены внутри (со съёмными экранами) и снаружи гермоотсека РОС

Рис. 11. Перспектива развития эксперимента «БТН-Нейтрон». Изображение ИКИ РАН

комплексные ядерно-физические исследования, включающие измерение фона нейтронного и гамма-излучения на орбите станции и на ее борту, оцениваться радиационная доза от этого излучения, изучаться ее зависимость от геомагнитной широты и от состояния земной магнитосферы. Также планируется испытывать защитные экраны от нейтронной радиации на борту станции и проводить мониторинг гамма-вспышек земного происхождения, солнечных вспышек и космических гамма-всплесков.

Было предложено, чтобы научная аппаратура эксперимента «БТН-РОС» состояла из двух больших блоков, один из которых установлен внутри гермоотсека, а другой снаружи. Каждый из них будет оснащен одинаковой детекторной частью, включающей детекторы, регистрирующие нейтроны в диапазоне от тепловых нейтронов до быстрых нейтронов, и гамма-спектрометр (гамма-кванты до 10 МэВ). Электроника детекторов должна обеспечивать по-нейтронную и пофотонную регистрацию с временным разрешением порядка нескольких микросекунд. Такое высокое временное разрешение позволит регистрировать гамма-вспышки

земного происхождения и космические гамма-всплески с максимальной эффективностью.

На блок, устанавливаемый внутри гермототсека, будут крепиться различные съёмные экраны, обеспечивающие защиту от нейтронного излучения. Их состав будет определен с учетом данных измерений прибора БТН-М2 на МКС. В ходе эксперимента «БТН-РОС» будут проверены их свойства и предложены варианты радиационной защиты для будущих лунных миссий.

Таким образом, предлагаемый эксперимент «БТН-РОС» будет реализован на полярной орбите РОС, что позволит впервые измерить глобальное распределение нейтронных и гамма потоков в околоземном пространстве для всех геомагнитных широт, причем в динамике – в зависимости от изменений потоков галактических и солнечных космических лучей. Размещение вне и внутри орбитальной станции идентичных нейтронного и гамма-детекторов, и одновременное проведение измерений нейтронов и гамма-лучей снаружи и вне РОС будет использовано для построения детальной инженерной модели полей космических излучений и радиационных доз на РОС. Эти результаты будут

иметь важное значение для разработки космических комплексов пилотируемых экспедиций на Луну.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ВЗГЛЯД ИЗ НАСТОЯЩЕГО В БУДУЩЕЕ

Эксперимент «БТН-Нейтрон», начавшийся 17 лет назад после установки вне гермоторсека МКС научной аппаратуры БТН-М1, предоставил обширную базу данных непрерывного и многолетнего мониторинга нейтронной компоненты радиационного фона на земной орбите и позволил не только измерить его долгопериодические вариации в течение солнечного цикла, но и оценить изменения фона при переходе от одного солнечного цикла к другому.

В 2024 г. начнется второй этап эксперимента, а проводимые измерения будут существенно расширены за счет возможностей новой научной аппаратуры БТН-М2, которая будет размещена внутри гермоторсека орбитальной станции. Синхронные измерения БТН-М1 и БТН-М2 позволят построить инженерную модель радиационного

фона МКС, а за счет сменных радиационно-защитных экранов будет изучена анизотропия нейтронного излучения внутри станции и проверены поглощающие свойства этих экранов, что пригодится при создании радиационно-защитных материалов нового поколения. В течение ближайших лет непрерывные измерения БТН-М2 будут разбиты на отдельные сеансы, в ходе которых будут собраны и протестированы различные комбинации защитных экранов от полной защиты (экраны со всех сторон) до измерений, в которых вся защита будет убрана.

Уже сейчас начата активная работа и на дальнюю перспективу, в рамках которой опыт проведения эксперимента «БТН-Нейтрон» будет перенесен на перспективную российскую станцию РОС, где эксперимент по синхронному наблюдению за нейтронным и гамма-фоном внутри и вне станции, а также тестирование различной конфигурации радиационной защиты будет продолжен теперь уже в условиях полета по околополярной орбите с непосредственным пролетом над областями магнитных полюсов Земли.

ПОКУПАЙТЕ ДЕШЕВЛЕ **КНИГИ** **ЖУРНАЛЫ**

В ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИНЕ ИЗДАТЕЛЬСТВА «НАУКА»

НАУКА
— 1727 —

www.naukabooks.ru

МОНИТОРИНГ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА И ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА



ИПАТОВ Александр Васильевич,

доктор технических наук

Институт прикладной астрономии РАН

ВЕДЕШИН Леонид Александрович,

доктор технических наук

Институт космических исследований РАН

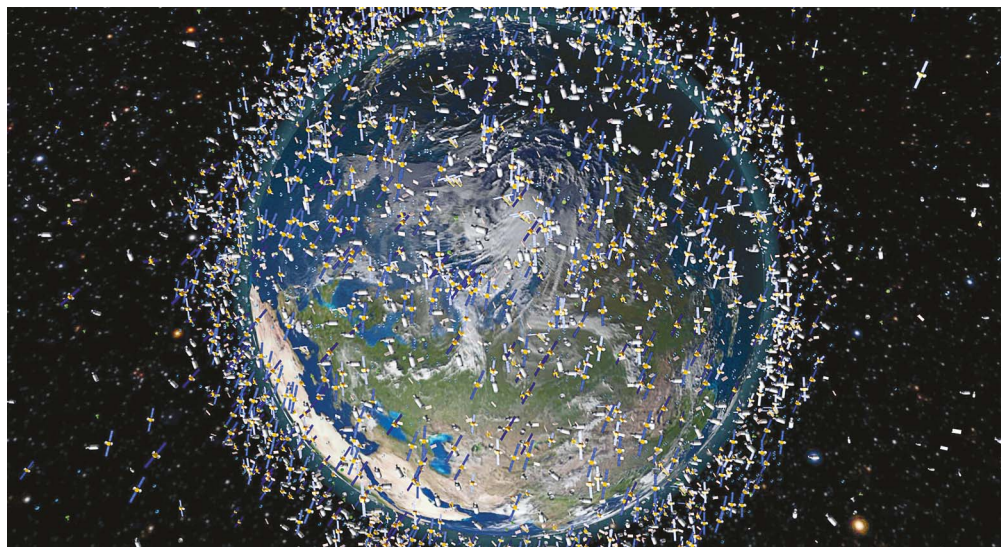
ГЕРАСЮТИН Сергей Александрович



DOI: 10.7868/50044394824020063

После запуска первого искусственного спутника Земли (ИСЗ) прошло более 65 лет. За это время человечество превратило орбиту планеты в огромную техногенную свалку, представляющую собой искусственные космические объекты (КО): ИСЗ, другие космические аппараты, их части, верхние ступени и разгонные блоки ракет и их обломки, а также опасные ядерные и токсичные материалы, мелкие чешуйки засохшей краски, частицы обшивки и т. д. КО не-

исправны и не функционируют, но являются опасным фактором воздействия на работающие космические аппараты (КА): ИСЗ, пилотируемые корабли и орбитальные станции. В околоземном космическом пространстве (ОКП) скопилось множество вышедших из строя КО и их фрагментов, которые представляют реальную опасность для КА, особенно пилотируемых. Космический мусор (техногенное засорение космоса (КМ) создает наиболее острую, пока



Так художник изобразил лавинообразное скопление в околоземном космосе действующих космических аппаратов и засорение его техногенным мусором

не решаемую экологическую проблему космонавтики и остановить процесс засорения ОКП невозможно. Сейчас для наблюдения за космическим мусором применяются различные системы контроля ОКП, крупные части КМ каталогизируются, осуществляется его мониторинг для предупреждения столкновения с ним КА, создаются различные методики очистки ОКП и проекты борьбы с КМ.

КОСМИЧЕСКИЙ МУСОР НА ОКОЛОЗЕМНОЙ ОРБИТЕ

Вселенная в представлении основоположника космонавтики К.Э. Циолковского является безграничным пространством для ее освоения: «Реактивные приборы завоюют людям беспредельные <космические> пространства и дадут <большую> солнечную энергию...»¹ В начале космической эры уче-

ным и конструкторам космической техники казалось, что осваивать эти просторы с точки зрения техногенных рисков не представляет никакой опасности для человечества и никогда не возникнут в этом плане какие-либо ограничения. Однако в наше время эти прогнозы оказались ошибочными, ОКП оказалось не таким бесконечным, а интенсивность запусков только возрастает. При освоении космоса в экологии Земли и ОКП произошло принципиально новое, причем драматическое событие: стала стремительно наращаться популяция техногенных КО, в которой большую долю составляет КМ. Первый КМ в огромном количестве впервые появился 29 июня 1961 г., после взрыва на орбите ступени американской ракеты-носителя Thor-Ablestar массой около 750 кг. Более 200 ее фрагментов разлетелись по орбитам высотой от 300 до 2200 км. В дальнейшем причинами разрушения КО стали самыми разными – самоуничтожение по окончании срока эксплуатации, аварии, взрывы, столкновения, намеренное уничтожение.

¹ Циолковский К.Э. Исследование мировых пространств реактивными приборами (издание 1911 г.) // Земля космическая. М.: Госкорпорация «Роскосмос», 2017. С. 322.

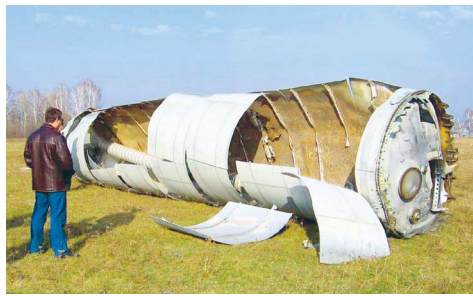
В 2023 г. было зарегистрировано более 40 тыс. пользователей космическими услугами из 120 стран мира. Собственными КА в 2010 г. обладали 111 стран, в 2020 г. на орбитах находились спутники 50 стран мира. С начала космической эры было осуществлено 6130 запусков, кроме аварийных, в результате чего на орбиты было выведено около 12230 ИСЗ, из них в космосе остаются 7600 КА, из которых еще функционируют около 4800 (после завершения вывода ИСЗ системы Starlink их количество превысит от 17 до 42 тыс.!), они контролируются наземными и космическими средствами наблюдения². В результате уже в 1970-е гг. в мире возникли проблемы, связанные с засорением ОКП вышедшими из строя фрагментами КО. Можно легко посчитать, какой кинетической энергией обладают при перемещении в космосе с первой космической скоростью эти фрагменты, и представить, к каким катастрофическим последствиям может привести их столкновение с действующими КО на встречных курсах. Эти разрушения иногда сопровождаются взрывами остатков топлива на орбите, что ведет к неконтролируемому саморазмножению КМ. Наиболее значимыми для образования КМ являются разрушения последних ступеней ракет-носителей и разгонных блоков, которые сопровождаются появлением большого числа обломков, а иногда падением на Землю крупных фрагментов (несгоревших частей конструкций КО, двигателей, радиоактивных элементов и др.). Баки и ступени ракет-носителей не обнаруживают, т. к. они упали не в районах падения, поэтому происходит загрязнение территорий, возникают зоны экологического

бедствия. Количество разрушений, взрывов, столкновений и аномальных событий на ОКП, приводящих к образованию на орбитах множества осколков, за весь период освоения космоса до 2021 г. было более 630². Этот процесс преобладает над самоочищением ОКП за счет торможения обломков КМ при вхождении в атмосферу Земли и поэтому количество КМ необратимо увеличивается.

Первая работа по оценке засоренности ОКП и опасности столкновения с КМ, опубликованная в 1977 г. американским инженером Дональдом Кесслером (Космический центр им. Л. Джонсона), вызвала интерес к этой проблеме у NASA, т. к. согласно его теории бесконтрольное увеличение числа КО на земной орбите может привести к каскадному эффекту, названному синдромом Кесслера³. Взрыв или разрушение одного из них породит тысячи осколков, которые ударят по соседним объектам, и они, в свою очередь, станут источником новых обломков. Таким образом, запускается цепная реакция возникновения все большего и большего числа осколков. Ввиду лавинообразного возникновения новых обломков низкие околоземные орбиты (особенно на высоте 750–1150 км) станут совершенно непригодными для космических полетов. Сейчас плотность КМ ежегодно увеличивается в среднем на 4–5%, расчеты показывают, что темп засорения ОКП прогрессивно нарастает: за 65 лет освоения космоса было осуществлено более 6 тыс. запусков ИСЗ, и только 10 из них породили одну треть каталога КО, причем большинство приходится на последние 15 лет. И это несмотря на постоянные призывы ученых

² Вениаминов С.С. Космический мусор. Техногенное засорение космоса и его последствия. 3-е изд., испр. и доп. М.: ИКИ РАН, 2023. С. 10, 78.

³ Kessler D., Cour-Palais B. Collisional frequency of artificial satellites: The creation of a debris belt // J. Geophysical Research. 1978. V. 83. Iss. A6; Kessler D. Collisional cascading: The limits of Population Growth in Low Earth Orbits // Advances Space Research. 1991. V. 11. Iss. 12.



Обломки одного из блоков первой ступени ракеты-носителя «Союз-2.16» в Амурской области (общая масса вывезенного мусора около 8 т). Запуски с космодрома Восточный 23 марта 2014 г. и 18 декабря 2020 г. (вверху и в центре). Топливный бак весом около 2 т ракеты-носителя «Протон» из четырех, обнаруженных на Алтае после старта с космодрома Байконур 4 июня 2010 г. (внизу). Роскосмос, РКК «Энергия»

ограничить дальнейшее засорение космоса⁴. Поэтому пути решения проблемы КМ должны быть разработаны как можно скорее.

СОСТАВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Крупные частицы КМ размером более 10 см стали представлять серьезную опасность для работы на орбите действующих ИСЗ, пилотируемых кораблей и орбитальных станций, поскольку самой плотно засоренной частью ОКП стали области рабочих орбит в диапазонах высот от 300 до 1000 км. Следующее опасное скопление КМ находится на геостационарной орбите (ГСО), расположенной на высоте примерно 36 тыс. км над экваториальным поясом планеты⁵ и на высокоэллипти-

ческих орбитах (ВЭО)⁶, используемых космическими системами связи, метеорологии и навигации.

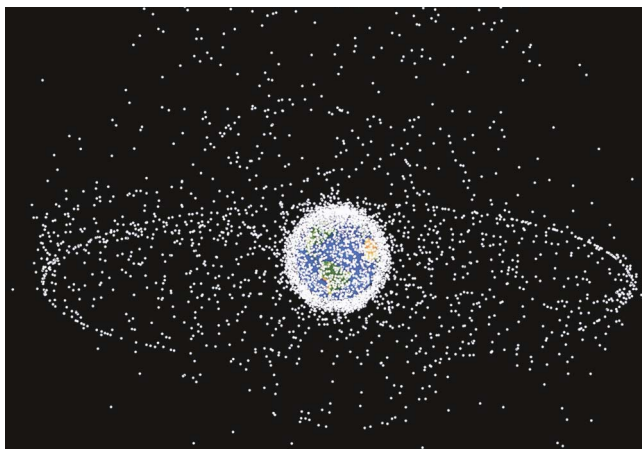
На околоземной орбите летают тысячи объектов КМ крупного размера и миллионы мелких фрагментов, а их общая масса составляет несколько тысяч тонн. К крупным объектам КМ относятся тела размером более 10 см, к средним – 1–10 см, к малым – 0.1–1 см. По данным ESA, в 2017 г. на орбите находились: 22 тыс. КО размером более 10 см, 750 тыс. фрагментов более 1 см и 166 млн частиц около 1 мм. Общая масса КМ, который больше не имеет практического применения, в ОКП оценивается в 7.5–9.5 тыс. т. Количество более мелких частиц в ОКП исчисляется уже миллиардами и триллионами! Микрочастицы, двигаясь со скоростью 2–20 км/с, находятся на высоте 500–2000 км, способны нанести

⁴ Вениаминов С.С. Космический мусор. М.: ИКИ РАН, 2023. С. 96.

⁵ Лёвкина П.А., Бахтигараев Н.С., Рыхлова Л.В., Горшков А.П. и др. О популяции малоразмерных фрагментов космического мусора геостационарной зоны // Научные труды Института астрономии РАН, 2019. Т. 4. С. 312–317.

⁶ ВЭО характеризуются превышением во много раз высоты в апогее по отношению к перигею, например, КА Integral имеет высоту в перигее 9743 км, в апогее – 152964 км.

Визуальная картина современного техногенного засорения ОКП, построенная на основе данных каталога КО СККП США, демонстрирующая явный «прогресс» в засорении ОКП за последние 30 лет. Изображенный на рисунке КМ – лишь очень скромная надводная часть «айсберга». Satellite box score (as of 21 Nov. 2021) // Orbital Debris Quarterly News. 2021. V. 25. Iss. 4



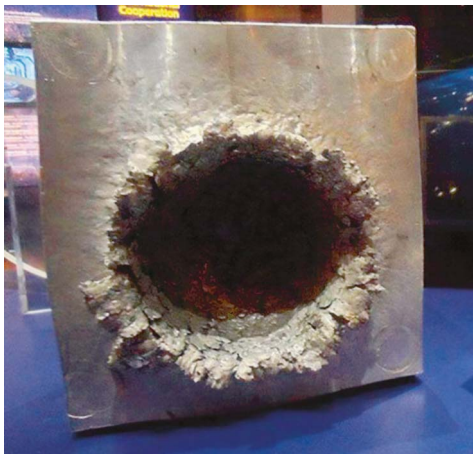
существенный ущерб или вывести из строя КА⁷.

Приведем примеры. 15 октября 1965 г. на околоземной орбите на высоте 740 км взорвались остатки топлива в баках американского разгонного блока Transtage (длина 4.57 м, масса более 2 т), в космосе возникло облако осколков в количестве 470 фрагментов. 17 октября 1970 г. на высоте 1075 км

разрушились баки американской ракетной ступени Agena-D № 6323 (длина 1.52 м, масса более 700 кг), появилось облако из 372 обломков; в 2002 и 2006 гг. взорвались верхние ступени 1.2-тонной европейской Ariane-4 (9 лет полета, 120 осколков) и 1-тонной японской H-II F-5, которая не смогла вывести ИСЗ на заданную орбиту. 13 сентября 1985 г. на высоте 525 км осуществлен преднамеренный подрыв американского военного ИСЗ Solwind P-78-1 в рамках системы противоспутникового оружия воздушного базирования

⁷ Миронов В.В., Усовик И.В. Ретроспектива проблемы космического мусора // Космические исследования, 2020. Т. 58. № 2. С. 117–130.





Отверстие диаметром 13 см на алюминиевой плите толщиной 10,2 см, защищающей критические места на корпусе американского сегмента МКС, возникшей от удара космического мусора – кусочка пластика размером около 1 см, двигавшийся со скоростью около 6,7 км/с. NASA

ASM-135, в результате образовались 285 осколков. 13 ноября 1986 г. на высоте 805 км по неизвестной причине взорвалась двигательная установка *Mage-1* (длина 1,13 м, масса около 40 кг), в результате в космосе возникли 488 обломков, в феврале 1987 г. было выявлено 465 фрагментов, которые образовали на высоте 500–1400 км вокруг Земли тор шириной 30°. Этот тор КМ расширился на 10° в месяц, оказалось, что взрыв стал самым разрушительным в истории космонавтики, в результате которого образовалось более 500 фрагментов и 5000 более мелких осколков, способных причинить существенный ущерб действующим КА. До 2020 г. официально было зарегистрировано более 250 разрушений КО⁸.

Как известно, постепенно КМ входит в атмосферу и сгорает, но на орбитах высотой более 1000 км они мо-

гут оставаться в течение сотен и тысяч лет, а на геостационарной – миллион лет! Частицы диаметром менее 1 мм представляют основную причину эрозии КА. На некоторых КА от таких частиц, например на российском модуле «Заря» МКС, устанавливают защитный противометеоритный экран. От частиц крупнее 1 см и движущихся со скоростью более 5 км/с бессмысленно ставить такой щит, КМ, летящие со скоростью пули способны разрушить любой щит КА. NASA провело эксперимент в течение 10 лет: на КА установили противометеоритный экран площадью 151 м², после его возвращения на экране насчитали 30 тыс. пробоин, кратеров и трещин, из них 5 тыс. диаметром свыше 0,5 мм. На американском шаттле возвратили на Землю часть плиты американского сегмента МКС с огромным отверстием диаметром 13 см от удара КМ размером около 1 см, двигавшегося со скоростью около 6,7 км/с. Конструкторы КА признали, что их надежно защитить от микрочастиц невозможно⁹.

Известны расчетные теоретические данные, указывающие на то, что популяция КО размером от 5 мм до 1 см составляет около 80% от общей популяции орбитального мусора размером более 5 мм. С этой «мелочью» приходится считаться, так как опасность ее определяется не столько размерами, сколько огромной скоростью движения и количеством¹⁰. При этом действующие КО составляют лишь малую часть – до 6%, среди крупных объектов всей группировки КМ. Иногда части КМ могут быть достаточно крупными или содержать большое количество вредных компо-

⁸ Вениаминов С.С. Космический мусор. М.: ИКИ РАН, 2023. С. 128–140.

⁹ Новое о «космическом мусоре» // Земля и Вселенная, 2003. № 2. С. 78; Crowther R. Space junk-protecting space for future generations // Science, 2002. V. 296. Iss. 5571. P. 1241–1242.

¹⁰ Вениаминов С.С. Космический мусор. М.: ИКИ РАН, 2023. С. 80.

нентов, представляющих опасность планете при их бесконтрольном сходе с орбиты или не полном сгорании в атмосфере Земли. Падение таких обломков может серьезно повредить инфраструктуру населенных пунктов, производственных предприятий, важные транспортные узлы и т. д.

СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И КОНТРОЛЯ ОКП

Оптические и радиолокационные инструменты, позволяющие наблюдать за ОКП, были разработаны еще в середине прошлого века в Советском Союзе и США. В настоящее время в мире существуют две основные системы контроля космического пространства (СККП): российская и американская SPADATS (наряду с Англией, Китаем, Францией, Японией и др.), которые осуществляют наблюдения за всеми КО и КМ, в том числе за астероидами и кометами, представляющими угрозу человечеству. Ведь каждый день на нас обрушивается дождь из космоса – опасность, о которой мы не подозреваем. Микроскопические частицы КМ, астероидов и комет пролетают сквозь атмосферу и незаметно оседают на поверхности Земли, ежегодно образуя около 40 тыс. т пыли, из них на КМ приходится десятки тонн (например, в 2007 г. около 70 т). В 2011 г. баки верхних ступеней ракет-носителей сходили с орбит в среднем один раз в неделю, а поверхности Земли достигает не менее двух больших КО в год. Уже в ближайшие годы есть риск для жизни людей от

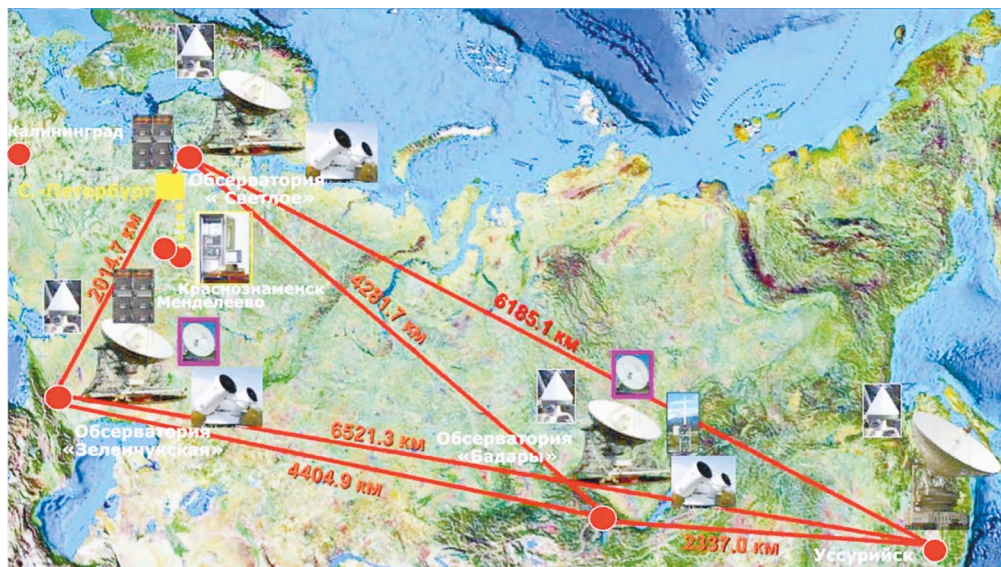
падения КМ. По мере того как растет число ракетно-космических компаний, число аварий как в космосе, так и на Земле также увеличится¹¹.

Дистанционные наблюдения КО и КМ осуществляются в РФ и США как оптическими, так и радиолокационными средствами. В этих наблюдениях используются радиотехнические, радиолокационные (РЛС), оптические, оптико-электронные и лазерные системы. РЛС есть в нескольких странах: в России «Дон-2Н», в США Goldstone Deep Space Communications Complex, Haystack, NAX и Cobra Dane, в Европе – TIRA (Германия), Fylingdales (Англия), GLOBUS III (Норвегия), GRAVES (Франция). РЛС в основном следят за КО и КМ, находящимися на низких околоземных орбитах высотой 100–2000 км, оптические измере-

¹¹ Шустов Б.Н. Космические опасности: ближний космос // Земля и Вселенная, 2021. № 6 (342). С. 59–69; Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Под ред. Б.Н. Шустова, Л.В. Рыхловой. М.: Физматлит, 2010.



Американская радиолокационная система кругового обзора дальнего обнаружения Cobra Dane с фазированной антенной решеткой, расположенная на о. Шемайя (Алеутские о-ва). Winkler D.F. Searching the skies., 1997. P. 86. Lockheed Martin.



Радиоинтерферометрическая сеть «Квазар-КВО» для контроля космического пространства. ИПА РАН

ния ведутся за объектами на высокой околоземной орбите (10–20 тыс. км). С помощью РЛС наблюдения ведутся при любых погодных условиях и постоянно в течение многих лет. Однако к недостаткам использования РЛС для обнаружения мелких частиц КМ на большом удалении от Земли следует отнести значительный расход электроэнергии и ограниченные возможности рабочей длины волны. Радиолокационные комплексы СККП РФ и SPADATS работают в различных диапазонах электромагнитного спектра по отраженному сигналу от миллиметрового до метрового, они обладают разной чувствительностью и способностью обнаружения КМ¹². Это приводит к тому, что в разных областях КП предельный размер обнаруживаемых и сопровождаемых объектов КМ отличается: для низких орбит он составляет 5–10 см, а для ГСО – 70–80 см.

¹² Вениаминов С.С. Космический мусор. М.: ИКИ РАН, 2023. С. 21–64.

Специалистами проводятся исследования с целью снижения этого порога путем использования средств контроля в нештатных (экспериментальных) режимах. Данные наблюдений РЛС обрабатываются с целью уточнения параметров орбит и получения некоординатной информации для регулярного уточнения каталога КО.

В России нашли применение оптико-электронные комплексы Роскосмоса и Института астрономии РАН, Института прикладной астрономии РАН (ИПА РАН) и других организаций. Высоточные радиотехнические наблюдения КО и небесных тел Солнечной системы в дальнем и ближнем космосе выполняются ИПА РАН с помощью двух радиотелескопов РТ-13 и трех РТ-32 РСДБ-комплекса «Квазар-КВО»¹³. Уже имеется опыт наблюдений ряда

¹³ Ипатов А.В., Ведешин Л.А. Перспективы использования радиотелескопов на Земле, в космосе и на Луне // Земля и Вселенная. 2021. № 3. С. 52–55.



Карта наземной сети опорных станций GGOS. ИПА РАН

КО с помощью навигационных систем ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), Galileo (ЕС), Beidou (Китай), в том числе КА серии «Космос», «РадиоАстрон», Mars Express, лунного посадочного аппарата «Чанъэ-3» и др. Институт астрономии РАН проводит наблюдения малоразмерных объектов в зоне ГСО с помощью довольно крупного телескопа «Цейсс-2000», а также изучение и мониторинг астероидов, сближающихся с Землей. Получаемые данные являются источником информации об опасных малоразмерных 0.2–1 м и слабых менее 16.5^m объектах в области ГСО и ВЗО. Для координатно-временного обеспечения системы ГЛОНАСС в радио-интерферометрических обсерваториях Светлое, Бадары и Зеленчукская комплекса «Квазар-КВО».

ИПА РАН организована наземная сеть опорных станций GGOS, проводятся высокоточные наблюдения с помощью дополнительно установленных трех лазерных станций «Сажень-ТМ». Наземный комплекс «Квазар» также используется для совместной работы с зарубежными приемниками КА «Глонасс-М» (РФ), Navstar-IIF/IIIA

(США), системы DORIS (Франция) и др. На территории России, ЮАР, Бразилии и Казахстана действуют 11 лазерных станций, образующих российскую сеть лазерной дальнометрии, входящих в состав Международной службы лазерной дальнометрии (International Laser Ranging Service) для высокоточного определения орбит спутников и координат лазерных станций. В целях повышения эффективности применения российских лазерных станций создан Центр сбора, обработки и анализа информации средств сети лазерной дальнометрии.

Наряду с РЛС за КО ведутся оптические наблюдения. КО можно обнаружить с помощью оптического телескопа, когда освещенный Солнцем объект находится на фоне темного неба. Для объектов на низких орбитах период возможного обнаружения ограничен 1–2 часами сразу после захода или до восхода Солнца. В то же время наблюдения объектов на ГСО часто могут продолжаться в течение всего ночного времени суток. Еще одна трудность, ограничивающая возможности проведения оптических измерений, состо-



Башня телескопа обсерватории института астрофизики Ла-Пальма (Канарские о-ва) – оптический пост наблюдения за космосом. Tim Rawle

ит в том, что небо должно быть ясным и темным. Оптические станции являются основным источником координатной и некоординатной информации по объектам КМ на ГСО и ВЭО. Они используются для решения задач поиска, обнаружения и сопровождения объектов, получения их фотометрических характеристик, оценки параметров движения объектов относительно центра масс и получения их изображений. Оптические средства научных учреждений РАН используются для глобального контроля ГСО по долготе $0-360^\circ$ и наклонению $0-20^\circ$, выборочному контролю КО на ВЭО типа «Молния» и геопереходных орбитах, а также автономного обнаружения и регулярного контроля малоразмерных объектов на ГСО и ВЭО. Одновременно российскими специалистами проводятся измерения и анализ данных об опасных КО в области высоких орбит. С помощью оптических систем успешно решаются задачи

обнаружения и сопровождения, вышедших из строя крупных КО и последних ступеней ракет-носителей, но не обеспечивается получение полной информации по технологическим элементам и фрагментарному мусору. Институт астрономии РАН проводит регулярные наблюдения малоразмерных объектов в зоне ГСО с помощью оптических телескопов, а также осуществляет изучение и мониторинг астероидов, сближающихся с Землей.

Оптические посты американской системы GEODSS расположены в районах Земного шара, отличающихся повышенной прозрачностью атмосферы, таких как Гавайские острова, Канарские острова и ряда других. Получаемые данные являются источником информации об опасных малоразмерных ($0.2-1$ м) и слабых (менее 16.5^m) объектах в области ГСО и ВЭО. Кроме названных методов, могут применяться и измерения КМ с борта КО,

например с МКС, Космического телескопа им. Э. Хаббла и др. Однако стоимость космических средств наблюдения за КМ выше стоимости систем наземного наблюдения. С целью систематизации и накопления сведений о засоренности орбит создаются специальные каталоги и базы данных.

В 2026 г. госкорпорация «Роскосмос» предполагает развернуть работы по созданию автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном пространстве (АСПОС ОКП) «Млечный путь», которые завершатся в 2035 г. Ключевыми свойствами новой системы, которая получит современные радиолокационные станции и космические аппараты с бортовыми оптическими комплексами, названы обеспечение глобальный и непрерывный мониторинг ОКП. Специалисты ЦНИИмаш совместно с разработчиком рассмотрели облик и технические характеристики оптико-электронной наблюдательной системы. Наземные комплексы, предположительно, будут располагаться на территории как стран Южной Америки, так и на Ближнем Востоке, в Азии и других регионах планеты. Автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве будет включать 65 телескопов и космический сегмент. Она должна не только качественно изменить степень нашей осведомленности о техногенной космической обстановке и засоренности КМ, но и позволит отслеживать риски столкновений КО на орбитах, а также предупредит о приближении опасных астероидов и комет, обеспечит прогнозирование «космической погоды». Перспективная система «Млечный путь» будет способна отслеживать КО размером от 5 см, находящиеся на высоте до 2500 км. Концепция «Млечного пути» была утверждена в начале

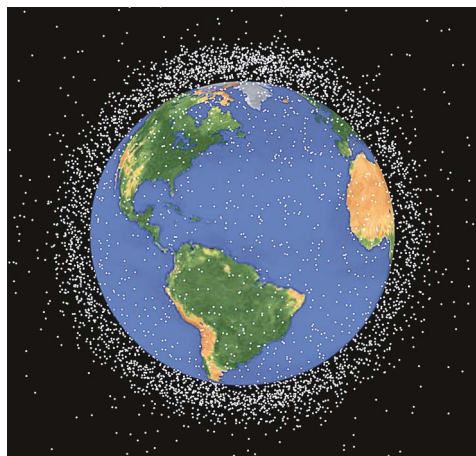


Один из оптических телескопов американской наземной электронно-оптической системы GEODSS для наблюдения за дальним космосом

2022 г. Ожидается, что она будет в разы эффективнее функционирующей в настоящее время системы АСПОС ОКП¹⁴.

Средства СККП США и России осуществляют наблюдение за всеми КО, которые могут быть обнаружены собственными техническими средствами. Специалистами проводятся исследования с целью снижения этого порога. Как выяснилось, это возможно при использовании средств контроля в нестандартных (экспериментальных) режимах. Полученные в результате наблюдения данные обрабатываются для уточнения параметров орбит, получения некоординатной информации и ведения регулярно уточняемого каталога КО. К сожалению, с помощью существующих средств обнаруживается и каталогизируется лишь небольшая доля общей популяции КО, в том числе КМ. Отслеживанием опасных КО занимаются многие организации: NASA, ESA, обсерватории крупнейших уни-

¹⁴ <https://iz.ru/1382395/2022-08-20/razrabotku-kosmicheskoi-sistemy-mlechnyi-put-zavershat-v-2035-godu>



верситетов. Кроме того, в мире имеется значительное количество измерительных средств и в других государствах, таких как Великобритания, Германия, Франция, Япония и др. Для этого используются РЛС и мощные телескопы, включая Космический телескоп Хаббла. В свою очередь, существует группа программ национального уровня, предназначенных для обнаружения КО и дальнейшего устранения КМ.

КАТАЛОГИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ СККП

С целью систематизации и накопления сведений о засоренности орбит создаются специальные каталоги и базы данных. Каталог представляет собой запись полученных с помощью измерений или отслеживания параметров засоренности орбит. Цели каталога состоят в том, чтобы определить нынешние параметры орбиты, на основе которых можно прогнозировать движение по орбите, и гарантировать корреляцию с данными наблюдений орбитальных объектов – предоставлять регистрацию динамических параметров орбитальных процессов для целей мониторинга ОКП; служить источником исходных данных для моделирования ха-

Общая визуальная картина КО на фоне Земли современного техногенного засорения ОКП, составленная на основе реальных данных каталога КО СККП США. Orbital Debris Quarterly News. 2011. V. 15. Iss. 4

рактеристик КО и обеспечивать основу для прогнозирования предстоящих запусков и оперативной деятельности. С помощью существующих средств наблюдения обнаруживается и каталогизируется лишь небольшая доля общей популяции КО (в том числе КМ) размером более 5 см. КМ разделены на три категории опасности: большие – более 1 м, средние – 10–100 см и малые – 1–10 см. Американская и российская СККП ведут динамические каталоги крупных КО, лишь порядка 5% последних составляют действующие, т. е. полезные КА, остальные 95% – крупный КМ с массой объектов от 300 г до 20 т. Сегодня общее количество каталогизированного КМ составляет порядка 30 380 суммарной массой более 9700 т. Количество КМ в ОКП крупнее 10 см, по оценкам статистических моделей, – 36 500, размером 1–10 см – порядка 1 млн, от 1 мм до 1 см – 330 млн. Средняя плотность частиц КМ равна 3 г/см³ для осколков размером 1–2.5 мм в низкоорбитальной области на высотах 400–2000 км, обобщенный результат можно проследить на кривой динамики изменения суммарной массы с 1962 по 2018 г.¹⁵

В настоящее время существуют два каталога КО, которые постоянно обновляются на основе результатов наблюдений: Каталог космического командования США и Каталог СККП РФ. Эта информация хранится также в базе данных DISCOS ESA, созданной на основе двух указанных каталогов. В каталоге американской военной системы

¹⁵ Вениаминов С.С. Космический мусор. М.: ИКИ РАН, 2023. С. 78, 160–161.

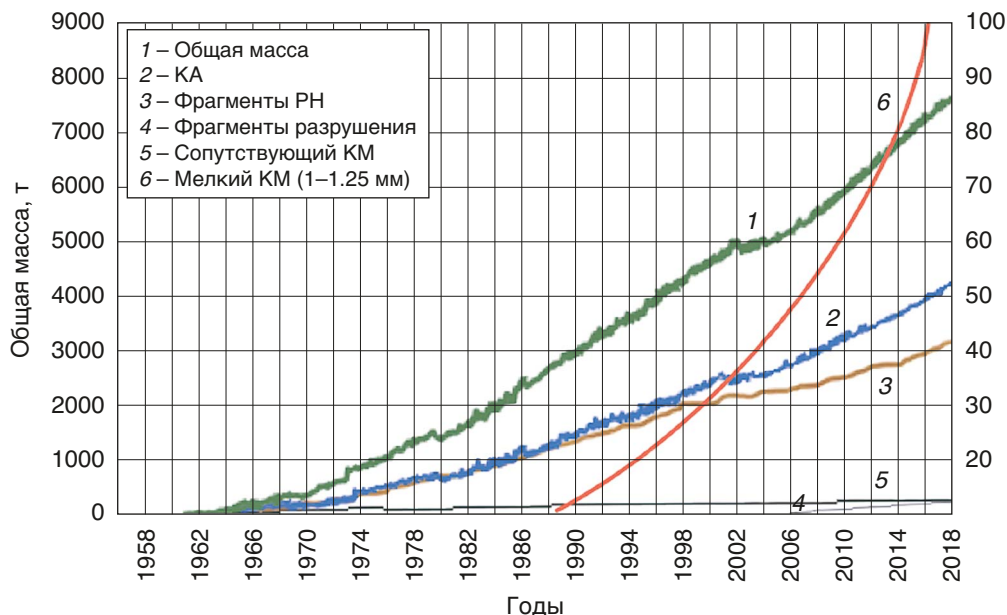


Диаграмма динамики увеличения массы космического мусора на околоземных орбитах с 1958 по 2018 г. Справа на диаграмме указаны проценты общей массы КМ. Каталог СККП США. *Orbital Debris Quarterly News*. 2012. V. 16. Iss. 1

США Space Surveillance Network имеет 23 тыс. крупных КО, из них действующие отслеживаемые космические аппараты составляют менее 5–6%. По данным подкомитета ООН по космосу, на низких околоземных орбитах находится до 10 тыс. т КМ. Некоторые из них постоянно меняют свою орбиту, сталкиваются между собой и разрушаются, увеличивая количество мелких частиц КМ.

ОПАСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ КМ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Российской СККП за прошлый год на земной орбите было зафиксировано восемь эпизодов разрушения КО. В докладе на Всероссийской конференции «Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты, угрозы», состоявшейся в 2019 г. в РАН, говорится, что с 2015 г. число космических за-

пусков увеличилось вдвое, и к концу прошлого года в КП под наблюдением находилось более 8 тыс. КО, при этом только 2.5 тыс. из них функционируют. Поэтому космическими державами в рамках ООН разрабатываются документы и законопроекты по борьбе с КМ и реализуется комплекс работ по снижению факторов, влияющих на загрязнение земной поверхности в результате космической деятельности. Ежегодно в рамках подкомитета ООН по космосу с участием российских и иностранных представителей рассматриваются вопросы международно-правового регулирования проблемы КМ, проводятся консультации специалистов по разработке методов количественной оценки КМ и рекомендаций по обеспечению безопасности полетов как пилотируемых кораблей и МКС, так и автоматических КО, на основе данных российской СККП и SPADATS.



Крупный фрагмент кислородного бака массой около 1200 кг американской орбитальной станции Skylab, упавший ночью с 11 на 12 июля 1979 г. на одну из ферм на территории Австралии. Ben Cooper/Launch Photography.com

Главная опасность КМ-столкновение с функционирующими КО. Из-за отсутствия в космосе силы трения КО и КМ вращаются по орбите планеты с огромной и постоянной скоростью. Даже маленький осколок способен повредить или уничтожить КО. Следует отметить особенность КМ, который способен воспроизводиться прямо на орбите: крупные обломки фрагментируются и образуют миллионы мелких осколков. Утилизация отработавших свой срок КО может происходить путем их постепенного спуска в атмосферу Земли или вывода на орбиты захоронения. Крупные части КО затопливают в несудоходных районах Мирового океана. Некоторые из них постоянно меняют свою орбиту, сталкиваются между собой и разрушаются, увеличивая количество частиц КМ.

В мире продолжают внеплановые массовые запуски КО. Несколько российских и зарубежных компаний ведут работы покрытия планеты доступным спутниковым интернетом. OneWeb планирует вывести на орбиту около 700 малых КО, SpaceX – 30–42 тыс. (!) КО Starlink массой менее 100 кг (уже запущено 2600). По российской федеральной целевой программе комплексного развития космических информа-

ционных технологий на период до 2030 г. госкорпорация «Роскосмос» планирует запустить 640 КА массой 150–600 кг в рамках системы «Сфера»¹⁶, призванная конкурировать с зарубежными системами OneWeb и Starlink. Кроме того, 3 октября 2023 г. Роскосмос сообщил, что в состав «Сферы» войдет также проект системы глобального мониторинга Земли «Грифон», группировка будет включать 136 КА формата CubeSat. К 2030 г. предполагается выйти как минимум на запуск одного спутника в день! Роскосмос будет вместе с частными компаниями, с привлечением внебюджетных средств работать над созданием еще более серьезной группировки¹⁷. Подобные проекты способны не только увеличить количество КМ, но и создать опасность столкновений для других работающих КО. При их экономических преимуществах (меньшая стоимость производства, запуска и др.), они обладают коротким сроком работы и практически неуправ-

¹⁶ 22 октября 2022 г. с космодрома Восточный запущен первый спутник-демонстратор «Скиф-Д» по программе «Сфера».

¹⁷ «Сфера» общих интересов // Роскосмос, 7 ноября 2020 г.: <https://www.roscosmos.ru/29535/>; [https://ru.wikipedia.org/wiki/Сфера_\(целевая_программа\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Сфера_(целевая_программа))

ляемы, поэтому для решения целевых задач требуется производить довольно частые замены КО на орбите. Другой проблемой в космосе могут стать CubeSat – малые или сверхмалые спутники массой от сотен грамм до 100 кг, ставшие особенно популярными в последние десятилетия из-за минимального веса и небольшой стоимости. Их выводят на орбиту в виде дополнительного груза десятками штук. При этом отработавшие малые КО могут оставаться в той же области ОКП, что и функционирующие. На служебных платформах малых КО при борьбе за каждый килограмм, как правило, не всегда предусматриваются двигательные установки и запасы топлива для увода с рабочей орбиты на орбиту захоронения. В перспективе при создании нано- и пикоспутников проблема еще более может усложниться, поскольку они довольно быстро становятся объектами КМ, плохо контролируемые средствами наблюдения за ОКП. При существующем темпе запусков КО, количество КМ в ОКП увеличивается в среднем на 5% в год, к 2030 г. – на 10% в год!

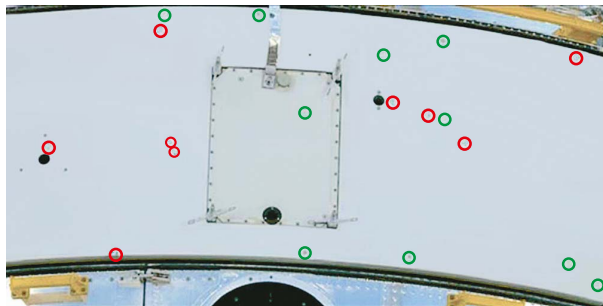
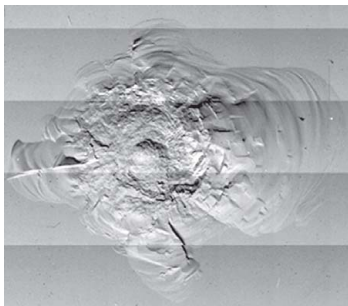
Еще одной проблемой, возникающей при наличии в ОКП техногенных объектов, является неконтролируемый сход с орбиты и падение на Землю крупных обломков КО и их несгоревших фрагментов. Ступени, топливные баки и части ракет-носителей падают на Землю, несмотря на их уборку и утилизацию, многие остаются не найденными, ухудшая экологию недалеко от районов космодромов. Например, 11 июля 1979 г. американская



Топливный бак 3-й ступени ракеты-носителя Delta (США) весом 56 кг, упавший в 2001 г. на территорию Саудовской Аравии. Ailor W. Overview: Space Debris and Reentry Hazards. Aerospace Corporation, 2008

орбитальная станция Skylab длиной 24.6 м и массой 77 т (запущена 14 мая 1973 г.) вошла в атмосферу для затопления в 1300 км южнее Кейптауна. Ошибка в расчетах в пределах 4% и непредусмотренное более медленное разрушение станции привели к смещению точки падения. Часть обломков упала на территорию Австралии, самый большой оказался кислородным баком длиной 1.5 и массой около 1200 кг, найденный в 480 км восточнее Перта. В музее г. Эсперанс находится 30 фрагментов станции Skylab, собранных местными жителями.

Особую опасность представляют падающие на Землю и разрушающиеся при входе в атмосферу КО с ядерными источниками энергии на борту, а также верхние ступени и разгонные блоки ракет-носителей с остатками токсичных компонентов ракетного топлива, способные нанести большой ущерб человеческой деятельности и вызвать серьезные экологические последствия.



Крупный кратер размером 10.3×12.4 мм на иллюминаторе корабля Endeavour STS-126 (слева). Радиатор Космического телескопа им. Хаббла размером 2.2×0.8 м с 685 кратерами от ударов частиц размером 300 мкм и крупнее: красными кружками помечены повреждения, обнаруженные в 2002 г., зелеными – новые кратеры, образованные КО до 2009 г. (справа). NASA. *Orbital Debris Quarterly News*. 2009. V. 13. Iss. 2, 3

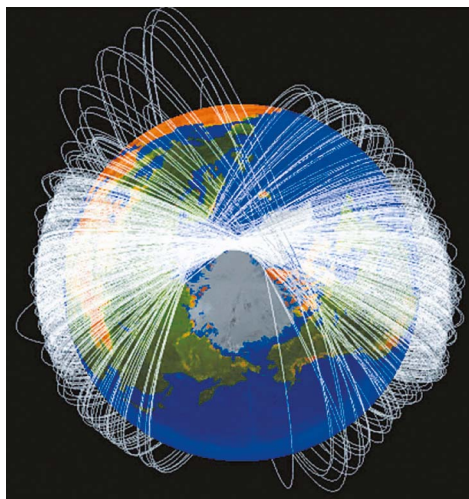
Примерами таких событий, вызвавших тревогу в правительственных кругах разных стран и большой резонанс мировой общественности, является падение на Землю фрагментов КО. 21 апреля 1964 г. американский навигационный ИСЗ Transit-5BN-3 при выводе на орбиту потерпел крушение на высоте 80 км над водами Индийского океана к северу от Мадагаскара. Большинство обломков сгорели в атмосфере, но на спутнике находилось 950 г радиоактивного плутония-238, который рассеялся в атмосфере, в результате его содержание в околоземном пространстве увеличилось в три раза. Дальнейший анализ почв помог обнаружить следы этого радиоактивного топлива на всех континентах! К 1970 г. в атмосфере Земли от испарившегося радиоактивного металла осталось лишь около 5%. Тем не менее этот инцидент стал первой серьезной аварией, заставившей специалистов задуматься о более безопасном использовании радиоактивных материалов на спутниках. С 1978 г. на Землю упали 10 КО с ядерными материалами¹⁸.

¹⁸ Вениаминов С.С. Космический мусор. М.: ИКИ РАН, 2023. С. 103, 129.

По информации NASA, каждый год несколько крупных фрагментов КО достигают поверхности Земли. В NASA считают, что треть крупных обломков на орбите – это следствие 10 неудачных миссий. Пока вероятность столкновений не слишком высока, но неприятные инциденты уже неоднократно случались: 24 июля 1996 г. ИСЗ CERISE (Франция) столкнулся с топливным баком ракеты-носителя Ariane-5 (ESA); 21 ноября 2001 г. российский КА «Космос-2367» массой 3 т разрушился от столкновения с КО всего в 30 км выше орбиты МКС с образованием 200 крупных и 100 мелких осколков, 40% из них оказались на орбите МКС; 29 марта 2006 г. после столкновения с КО из строя был выведен российский ИСЗ связи «Экспресс-AM11». 10 февраля 2009 г. ИСЗ связи Iridium (США) размером 1×2 м и массой 560 кг налетел на высоте 790 км при относительной скорости 11.6 км/с на неработающий российский ИСЗ «Космос-2251». Летом 2010 г. СККП США было зарегистрировано более 2100 фрагментов, разлетевшихся на высоты 500–1300 км, затем их число возросло до 6 тыс. Суммарное количество мелких осколков размером

около 1 см от ИСЗ «Фенгюн-1С» (см. ниже), «Иридиум-33» и «Космос-2251» по данным РЛС Haystack и НАХ составило более 250 тыс., а крупных, более 10 см, – 5500 (2 размером около 1 м и массой 360 кг, более 1 см – 146 тыс. общей массой 900 кг, 1–2.5 мм – 6.2 млн общей массой 30 кг). Только в результате этих двух катастрофических событий объем каталога КО скачком увеличился на 70%¹⁹! В начале сентября 2019 г. европейский метеоспутник «ADM-Aeolus» чудом избежал столкновения с ИСЗ Starlink.

Повреждения от столкновений с КМ получали пилотируемые корабли и МКС. В апреле 1983 г. после возвращения корабля Challenger STS-6 в его иллюминаторе был обнаружен след от удара микрочастицы краски. В июне 1999 г. Discovery STS-96 осуществлял первую стыковку с МКС, послеполетная инспекция выявила 64 повреждения размером 0.125–4.0 мм на поверхности шаттла. В августе 2005 г. после приземления при обследовании Discovery STS-114 выявили 41 след от ударов КМ, из них 14 пришлось на лобовые иллюминаторы кабины экипажа, поврежденными оказались 5 окон из 8, самый крупный кратер размером 5.8 × 6.6 мм обнаружен на окне № 4, вызванный ударом частицы диаметром 0.22 мм. В августе 2007 г. во время полета корабля Endeavour STS-118 к МКС были пробиты насквозь панель радиатора системы охлаждения и лежащее под ней теплозащитное покрытие толщиной 12.7 мм, входное отверстие от удара КМ до 2 мм имел размер 5.3 × 7.4 мм, осколки нанесли множественные повреждения вокруг основного отверстия. В ноябре 2008 г. во время полета корабля Endeavour STS-126 к МКС от удара частицы КМ на иллюминаторе



Расплывающийся с 11 января до 11 июля 2007 г. тороидальный пучок орбит осколков от разрушения ИСЗ «Фенгюн-1С» (Китай). Orbital Debris Quarterly News. 2008. V. 12. Iss. 2

образовался кратер размером 10.3 × 12.4 мм глубиной 0.63 мм. В мае 2009 г. на корабле Atlantis STS-125 возвращен на Землю радиатор Космического телескопа им. Хаббла размером 2.2 × 0.8 м, с 1993 г. экспонированный в космосе на высоте 560–620 км. Послеполетный анализ его поверхности с помощью цифрового микроскопа выявил 685 кратеров от ударов частиц размером 300 мкм и крупнее²⁰.

Процесс засорения ОКП тесно связан не только с самопроизвольным столкновением и разрушением ряда КО, так и с военными экспериментами и намеренным уничтожением вышедших из строя КО в результате испытания противоспутникового оружия. Приведем несколько примеров. 11 июня 2007 г. Китай в результате испытания кинетического противоспутникового оружия сбил баллистической ракетой со скоростью

¹⁹ Там же. С. 134, 140.

²⁰ Там же. С. 125–126, 132, 139–140, 164.



Отверстие в системе охлаждения системы терморегулирования корабля «Союз МС-22», образованное 15 декабря 2022 г. от удара КМ размером 1 мм. Sputnik / Пресс-служба Роскосмоса / РКК «Энергия»

9 км/с китайский ИСЗ «Фенгюн-1С» (№ 1999–025A) массой 960 кг на орбите высотой 850 км, через полгода было каталогизировано 2347, а к середине сентября 2010 г. в каталоге было 3037 осколков, которые распространились на высоте 200–4000 км, РЛС Haystack (США) зарегистрировал еще более 150 тыс. фрагментов размером до 1 см²¹. 21 февраля 2008 г. прошло испытание противоспутникового оружия ASAT в США, в результате которого ракетой SV-3 был разрушен на множество мелких осколков (360 было обнаружено и сопровождалось до их входа в атмосферу) неработающий военный ИСЗ USA-193 (№ 2006–057A) массой

²¹ Liou J.-C., Johnson N. Physical Properties of the Large Fengyun-1C Breakup Fragments // Orbital Debris Quarterly News. 2008. V. 12. Iss. 2.

2300 кг, содержащий в баках 454 кг ядовитого топлива (несимметричный диметилгидразин)²². Исторически одним из самых крупных разовых засорений космоса стал проект West Ford Министерства обороны США, реализованный в 1961–1963 гг., когда была создана искусственная ионосфера для обеспечения надежной космической связи. На орбиту высотой 350–380 км запустили почти 500 млн тонких медных иголок длиной 1.78 см. Иглы разлетелись, образовав огромное тороидальное облако, состоялся сеанс радиосвязи. Большая их часть сгорела в атмосфере, но более 40 скоплений КМ до сих пор находится на орбите. Эти испытания создают дополнительную угрозу для КО, находящихся на орбите.

Особую опасность КМ представляет для безопасности полетов пилотируемых кораблей и орбитальных станций на высотах 250–400 км, метеоспутников и ИСЗ дистанционного зондирования на орбитах 600–900 км, связных, навигационных, военных ИСЗ и космических астрономических обсерваторий на ВЭО и ГСО, а также для межпланетных станций, выводимых на промежуточные орбиты. Например, 15 декабря 2022 г. от удара КМ размером 1 мм в радиаторе системы охлаждения системы терморегулирования корабля «Союз МС-22» образовалось отверстие, в итоге спуск экипажа на данном корабле признали рискованным, и он вернулся с орбиты без экипажа через несколько дней. В настоящее время эффективных мер защиты от столкновения с опасными фрагментами размером более 1 см на низких орбитах и более 3 см на ГСО практически нет.

²² Вениаминов С.С. Космический мусор. М.: ИКИ РАН, 2023. С. 129, 134–135, 149.

Продолжение следует в ЗиВ №3 за 2024 год

О ЧЕМ ЗВУЧАТ МЕТЕОРЫ

МОРОЗОВА Татьяна Игоревна,

кандидат физико-математических наук

Институт космических исследований РАН

DOI: 10.7868/50044394824020075



Метеоры – это явления, которые своей загадочностью всегда привлекали человека. Метеорное вещество постоянно поступает в атмосферу Земли. В день на Землю выпадает около 100 тонн космической пыли (а на ранней Земле это число было в разы больше). Сравнительно небольшие метеорные тела сгорают на высотах 80–120 км, более крупные могут проникать в глубокие слои атмосферы и достигать поверхности Земли.

Метеоры входят в атмосферу Земли со скоростями 11.2–72.1 км/с. Нижний предел определяется второй космической скоростью (найденной из баланса энергий – сумма кинетической энергии космического тела и энергии гравитационного притяжения Земли равны нулю) и скорости, равняющейся сумме орбитального движения Земли (29.8 км/с) и третьей космической скорости, которую необходимо сообщить телу на Земле, чтобы оно навсегда покинуло пределы Солнечной системы (на расстоянии Земли величина этой параболической скорости составляет 42.2 км/с).

Чем же так привлекательны метеоры? Помимо внезапности своего появления и возникновения узкой полосы светящегося следа (либо широкого газо-пылевого следа в случае крупных метеорных тел), метеоры также звучат. Кроме обычных звуковых явлений, производимых от ударной волны метеороида и идущих с задержкой относительно

его полета¹, существуют удивительные явления, называемые электрофонными звуками, слышимые одновременно с пролетом метеороидов. Такие аномальные звуки, очевидно, связаны с электромагнитными явлениями (так как скорость их распространения должна быть равна скорости света, потому что метеор регистрируется по свечению). Электрофонные явления впервые были задетектированы в 1794 году. Однако, такие явления наблюдаются не для всех метеорных тел. Разберемся, почему же это происходит.

Следует сразу ввести несколько важных понятий, связанных с метеорами, чтобы избежать путаницы.

Метеороид (или метеорное тело) – это тело, летящее в атмосфере или вне ее.

Метеорит – это упавшее на Землю метеорное тело.

Метеор – это явление, которое представляет собой свечение паров метеороида.

Метеорный след – это след, остающийся в атмосфере после пролета метеороида. Болид – это яркий метеор с яркостью

¹ Скорость света, определяющая видимое свечение метеороида в 10^6 раз превышает скорость звука, и получается, что с высоты 100 км звуковая волна от метеора идет 5 минут, в то время как свет до нас доходит практически мгновенно. Обычная звуковая волна от метеороида возникает в результате колебаний плотности воздуха из-за его сжатия в результате образования ударной волны. Звуковая волна является продольной волной.

выше яркости Венеры. Непосредственно за самим метеорным следом тянется так называемый метеорный хвост. О различных типах следов и хвостов метеороидов мы поговорим позднее.

При достижении метеорным телом определенной высоты в атмосфере, на которой происходит его дробление и сгорание, наблюдатели могут слышать различные звуки, такие как свист, треск, шипение, гул. Они могут описываться не одним, а несколькими физическими механизмами. До сих пор не было предложено однозначного объяснения возникновения электрофонных звуков, однако, выдвигаются различные гипотезы и строятся модели.

И.С. Астапович создал каталог наблюдений электрофонных шумов 1929 году. Из каталога видно, что звуковые эффекты одновременно с пролетом ярких метеороидов наблюдались как в дневное время, так и в ночное, и независимо от времени суток наблюдатели слышали различные звуки – свист, шипение, жужжание, звуки, похожие на рев самолета. Отсюда можно сделать вывод, что генерируемые метеороидом частоты лежат в достаточно широком диапазоне слышимых человеческим ухом частот и что эти эффекты не зависят от варьирования параметров Земной ионосферы из-за смены дня и ночи и отсутствия или присутствия солнечного излучения. Значит эффекты, связанные с метеороидами имеют гораздо большую интенсивность, нежели солнечное излучение. Также из карты наблюдений и регистрации звуков очевидцами для различных метеорных тел видно, что наблюдатели, зарегистрировавшие звуки, находились в ореоле распространения сферической волны от метеороида.

Из наиболее ярких и емких первых регистраций шумов электрофонных метеороидов можно привести магнитофонную запись жительницы Северной Исландии, которая решила записать пение птиц как раз во время падения метеорита Боведи-Спрюсфилд

в 1969 году. С записи учеными была сделана осциллограмма, которая показала частоты от метеороида в диапазоне 200–400 Гц, длительность отдельных звуковых импульсов 0.01–0.11 с, а общая продолжительность звуков 5.5 с или дольше.

Были проведены эксперименты по регистрации инфразвуковых волн канадскими учеными в 1974 году. Регистрировались волны от ярких метеоров на частотах 0.2–5 Гц. Вскоре им удалось записать и звуки от метеоров.

В настоящее время у человечества имеется гораздо больший арсенал средств, которые могут регистрировать пролеты метеоров, такие как фото-, аудио- и видеосъемка. Например, в случае Челябинского события в 2013 году, видеорегистраторы множества водителей зафиксировали шипения при пролете метеороида.

*Ничего так не бодрит,
как с утра метеорит...*

Проводились и проводятся эксперименты по электрофонным шумам и их регистрации, однако, все еще не приводилось достаточно однозначного обоснования природы их происхождения и не построена единая теория, объясняющая эти явления.

К возможным теориям происхождения электрофонных звуков от пролетов метеороидов относятся (в начале приводятся более ранние теории, чтобы осознать ход мысли ученых в этом исследовании):

1) Электростатическое происхождение звуков. Однако для возникновения достаточной величины коронирующего отрицательного заряда на уровне почвы необходим положительный заряд в атмосфере, равный заряду всей Е-области ионосферы (область, которая расположена на высотах 90–120 км) [1]. Коронирующий разряд – это газовый разряд, который возникает при высокой напряженности электрического поля в случае, когда поле неоднородно. Предполагается, что индуцированные отрицательные заряды, возникшие

на земных предметах при мгновенном скачке геопотенциала до 15 кЭв и выше стекают с них. Это объясняет помимо звуков появление огней Эльма (кистеобразных разрядов на концах острых предметов), шаровых молний и запаха озона при пролете ярких болидов.

2) Ударная волна с метеороидом принимается за одну пластину конденсатора, а Земля – за другую. Колебания потенциала между пластинами приводят к возникновению шума, происхождение которого остается неясным.

3) Звуки, слышимые от высокочастотного передатчика и преобразующиеся в ушной раковине как звуковые волны.

4) Турбулизация хвоста и вытеснение геомагнитного поля из хвоста метеороида. Состояние турбулентности характеризуется тем, что начинают преувеличивать нелинейные эффекты, в том числе в системе будут возбуждаться нелинейные волны большой амплитуды. Теоретически построенная теория Бронштэна [2] основывается на экспериментах Кея [3]. Турбулентные вихри при определенных условиях могут закручивать силовые линии геомагнитного поля и поле в следе резко возрастает. Спустя некоторое время оно разрушается, отдавая энергию пространству, в частности, и в виде радиоволн. Для ярких болидов такие потери энергии на превращение в радиоволны оказываются достаточными для создания звуковых явлений у поверхности. Кеем был предложен механизм преобразования радиоволн в диапазоне нескольких кГц в звуковые волны посредством приемников у поверхности Земли. Возможность этого подтверждают проводимые им эксперименты, в которых он усаживал испытуемых в звукоизолированном помещении и подвергал воздействию переменного электрического поля с напряженностью 130 В/м и звуковой частотой несколько килогерц. Те испытуемые, которые имели очки в металлической оправе или длинные волосы, слышали звуки. Дужки очков и волосы в данном случае яв-

лялись антеннами, которые детектировали электромагнитные колебания и вместе с ушной раковиной превращали их в слышимые человеческим ухом звуковые волны.

Сейчас есть и другие механизмы по объяснению преобразования радиоволн в звуковые волны у поверхности Земли. Например, в статье [4] предполагалось, что сильно модулированный свет высокой интенсивности на этих частотах может создавать звуки через нагрев излучением поверхностей таких диэлектрических материалов, как волосы, одежда и листья. Расчеты показали, что метеор со звездной величиной –12 может порождать слышимый звук с силой 25 Дб (что соответствует уровню громкости шепота на расстоянии 1 м).

Эти механизмы по преобразованию электромагнитных волн от метеороидов в звуковые принимаются во внимание и в других моделях, описывающих появление электрофонных звуков (пункты 8 и 10).

5) Излучение волн на частотах самой плазмы. Однако подробное рассмотрение данного механизма не было проведено.

6) Механизм пробоя: метеорный след рассматривается как эллипсоид, который находится во внешнем электрическом поле Земли.

7) Вытеснение дипольного момента Земли: сильная вытянутость метеорного следа может привести к значительным возмущениям постоянного электрического и магнитного полей Земли.

8) Механизм преобразования модулированного электромагнитного сигнала от метеороида в звуковые волны, в котором предполагается, что метеор ионизует атмосферный воздух и генерирует электромагнитные волны в радиодиапазоне порядка десятков и сотен МГц, модулированные в слышимом диапазоне частот (20–20 000 Гц). Для того чтобы наблюдатели воспринимали данные сигналы как звуковые волны, необходим приемник, который проводит электричество лучше

в одном направлении, чем в противоположном, и способен вибрировать (возможно, резонировать) на звуковых частотах.

9) Механизм, объясняющий модуляцию электромагнитных волн. Показано влияние пылевых частиц в хвосте метеороида на данные процессы. А именно, возникающие низкочастотные пылевые звуковые колебания модулируют исходную волну. У Земли эта модулированная электромагнитная волна может преобразовываться в звуковую посредством приемников и других упомянутых выше механизмов.

Однако механизмы генерации радиоволн от метеоров также остаются неясными, хотя их регистрация не подвергается сомнению и мы точно знаем, что метеоры кроме излучения в видимом диапазоне излучают в радио диапазоне. Загадочные явления метеоров продолжают хранить тайны.

Эксперименты по регистрации шумов от пролета метеорных тел активно проводятся в настоящее время. Были зарегистрированы аномальные «шипящие» и «свистящие» звуки, сопровождающих прохождение крупных болидов на частотах от нескольких Гц до нескольких кГц, а также звуки во время метеорных потоков Леониды с максимумами частот 250 Гц. Было проведено детектирование низкочастотных электромагнитных колебаний от метеороидов на схожих частотах: 0.1 Гц – 12 кГц с усилением на 10–300 Гц.

Во время падения метеорного тела в Чехии 9 декабря 2014 года люди, находившиеся в разных локациях, слышали звуки одновременно с пролетом метеорного тела, без задержки, при этом зафиксированная частота колебаний была ниже 100 Гц.

В случае челябинского события 15 февраля 2013 года, когда в атмосферу Земли вошел астероид с предположительной массой 10 тысяч тонн, наблюдатели слышали шипение и треск. В ноябре 2017 года в Японии пролетел сверхяркий болид, масса которого оказалась сильно меньше, чем при паде-

нии Челябинского метеорита. В этом случае очевидцы тоже слышали громкий треск.

Ранее в наблюдениях отмечалось, что звучат только яркие метеоры. Однако данные по регистрации колебаний от метеорных потоков, таких как Леониды, показали, что они также порождают шумы на низких частотах порядка 10–300 Гц. Наличие или отсутствие электрофонных звуков зависит от множества факторов, таких, как параметры хвоста метеороида и самого метеорного тела, наличие приемников радиоволн и, возможно, других еще неизученных вопросов.

Помимо звуковых явлений, связанных с пролетом метеорных тел, метеороидные следы отражают радиоволны (появляется так называемое радиоэхо), а перед метеорным телом часто появляется головное эхо. На регистрации отраженных радиоволн построен метод радиолокационного поиска метеоров.

Свечение метеора тоже не так обычно. Спектроскопическими методами можно наблюдать полосы различных металлов метеорного вещества (Na, Mg, Ca, Al, Fe, Ni и др.), а также атмосферных молекул. Свечение метеора происходит в результате возбуждения атомов, молекул и ионов при их соударениях (т. е. изменении их электронной оболочки и увеличении энергии). Когда возбужденный атом переходит на нормальный уровень, он испускает свет. Интересно, что в спектре метеора можно наблюдать зеленую линию атома кислорода, как у северных сияний, однако красной линии не наблюдается. Зеленое свечение также сопровождается появлением головного эха.

Попробуем разобраться, почему это происходит. Введем еще несколько понятий.

Метеороидные следы бывают нескольких типов в зависимости от линейной электронной плотности. В результате метеорной ионизации, когда испарившиеся молекулы метеорного вещества, диссоциированные на ато-

мы, на больших скоростях сталкиваются с атмосферными атомами и молекулами, образуется электронно-ионный след. Испарившиеся молекулы имеют примерно ту же скорость, что и метеорное тело или меньше и могут испытывать столкновения в хвосте метеороида. То есть метеорное тело улетает, оставляя за собой ионизованные атомы, электроны, а также возбужденные атомы, которые дают свечение метеора. Энергия столкновения метеорного тела с частицами воздуха зависит от скорости метеорных тел и колеблется от 16.6 до 1675 эВ ($1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$) для характерных скоростей метеороидов. Также в процессах образования ионно-электронного следа участвуют термоионная и термоэлектронная эмиссии с поверхности метеорного тела. В этом следе также могут присутствовать пылевые частицы раздробленного метеорного вещества, застывшие капли расплавленной пленки метеорного тела и конденсированные пары метеороида. Пылевые частицы в метеорном следе приобретают заряды из-за воздействия на них различных токов (токов окружающих электронов и ионов, а также эмиссионных токов). Такая плазма метеороидного хвоста считается квазинейтральной (то есть концентрация положительно заряженных частиц равна концентрации отрицательно заряженных для однозарядных частиц).

Ненасыщенными называются следы с электронной плотностью меньше 10^{12} электрон/см пути метеора. В этом случае каждый электрон отражает падающую на него волну сам по себе и след оказывается прозрачен для радиоволн.

Переходными считаются следы с плотностью порядка 10^{12} электрон/см.

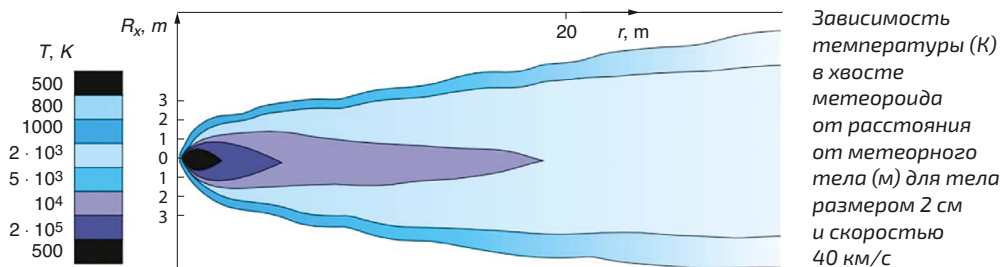
Насыщенными называются следы с электронной плотностью больше 10^{12} электрон/см. В этом случае электроны ведут себя как единое целое, подобно сплошной металлической поверхности. Насыщенные следы отражают радиоволны и образуют радиоэхо метеора.

Полная концентрация электронов и ионов в следе убывает с расстоянием от метеорного тела и к периферии следа.

Температура электронов за фронтом ударной волны для типового метеороида составляет 30 000 К, однако, может варьироваться от 20 000 до 200 000 К в зависимости от высоты, размера и скорости метеороида. Она спадает со временем по степенному закону в результате быстрого охлаждения электронов следа.

Зеленое свечение происходит в результате перехода с метастабильного уровня ($1S_0$) атома кислорода. Метастабильным он называется потому, что электрон удерживается на нем достаточно долго – 0.75 секунды. Эта линия наблюдается на высотах 75–120 км, где плотность воздуха мала и атом успевает продержаться без столкновений с другими атомами в течении этого времени. Зеленое свечение также наблюдается во время северных сияний. Но, в отличие от них, в следах метеороидов не наблюдается красной запрещенной линии, которая относится к состоянию $1D$ кислорода, так как его время жизни гораздо дольше – 110 секунд и в плазме хвоста метеороида так долго этот уровень продержаться не может [2]. В слое взаимодействия перед метеорным телом, где встречаются испарившиеся, отраженные и набегающие молекулы и атомы, происходит их возбуждение, которое создает головное эхо метеора. Также в этом слое в результате рекомбинации атомов кислорода с электронами происходит возбуждение уровня $1S_0$ атома кислорода и появляется зеленое свечение, что подтверждается наблюдениями.

Взаимодействие молекул воздуха с метеороидами, летящим со скоростями 11–72 км/сек приводит к тому, что вокруг метеороида образуется ударная волна, высокое давление и температура, вещество метеороида начинает дробиться, плавиться и испаряться. Ударная волна является разрывом в гидродинамических параметрах – плотности, давлении и температуре.



Абляция – это процесс потери массы метеороидом в результате испарения, плавления и сдувания пленки расплава и дробления. До сих пор остается открытым вопрос, какой из механизмов абляции является лидирующим для метеорных тел. Скорее всего, это зависит от параметров метеороидов (материала, скорости, размеров) и проявляется по-разному. При столкновении метеорных тел с набегающими атомами и молекулами воздуха может происходить испарение отдельных атомов и молекул метеорного вещества, в то время как плавление еще не происходит. Для столкновений важным оказывается импульс метеорного тела, так что для малых тел испарение не будет играть большую роль. В результате того, что испарившиеся атомы метеорных тел сталкиваются с молекулами воздуха, может происходить их возбуждение (приводящее к свечению) и ионизация, о которых мы упоминали ранее. То есть это процессы, следующие за абляцией.

Микрометеороиды с размерами до 5 мкм (для каменных тел) и с размерами до 2 мкм (для железных тел) не успевают нагреваться в атмосфере до температуры плавления и проходят ее практически беспрепятственно.

Массы наблюдаемых метеорных тел лежат в широком диапазоне величин – от 10^{-7} г до 10^7 г. Например, для метеорных потоков, таких как Персеиды, Леониды, Ореониды, Драконида, характерные размеры метеоров невелики – от долей грамма до нескольких грамм. Однако отдельные метеоры имеют достаточно большую массу.

Метеорные потоки можно наблюдать невооруженным глазом. В ясную ночь августа (Персеиды), октября (Драконида, Ориониды) или ноября (Ориониды, Леониды) на небе можно заметить светящиеся следы, которые оставляют падающие тела. Обычно эти следы видны доли секунды, но для сравнительно крупных метеорных тел могут держаться и дольше.

Метеорные потоки представляют собой падающие части раздробленной кометы и возникают, когда Земля пересекает орбиту кометы, на которой та оставляет свои фрагменты. Усиленные потоки наблюдаются в том случае, когда комета сравнительно недавно проходила по своей орбите через место ее пересечения с Землей.

Поговорим более подробно о метеорных следах. Метеорные следы бывают пыле-газовые и ионизованные. Пылевые следы образуются только яркими болидами на высоте 25–80 км в результате конденсации паров метеорного вещества в головной части и хвосте метеороида и затвердевания конденсированного вещества. Таким образом, след включает в себя пылевые частицы размерами меньше 10^{-4} см, жидкие капли метеорного вещества и газы. В сумерки они светятся вследствие рассеяния солнечного света в основном на пылевых частицах. Пылевые метеорные следы могут наблюдаться очень долго – до нескольких часов.

Ионизованные метеорные следы наблюдаются от долей секунды до нескольких минут (в зависимости от массы метеорного тела и яркости метеора). Они также могут включать в себя

пылевые частицы, образуемые в результате дробления метеорного тела. Ионизованный след отражает радиоволны метрового и дециметрового диапазонов. Метеорная ионизация наиболее интенсивна на высотах 80–120 км. Пылевой след метеороида также называется в литературе как хвост метеороида (wake).

Отделение частей метеорного тела происходит из-за механического дробления, вызванного давлением набегающего потока, термомеханического дробления, появляющегося в результате возникновения термических напряжений при повышении температуры в следе и дробления, когда электростатическое давление вследствие приобретения метеорным телом поверхностного заряда из-за эмиссий и выбивания электронов и ионов набегающими атомами превышает прочностные характеристики материала.

Согласно «гипотезе о пылевых комочках», некоторые метеорные тела имеют рыхлую структуру. Эта гипотеза хорошо согласуется с данными высот, на которых исчезают метеоры, и с их яркостью. Благодаря рыхлой структуре метеорные тела имеют меньшую массу, светятся ярче (так как имеют большую площадь поверхности тела) и дробятся интенсивнее из-за меньшей плотности. Плотность самих зерен, которые, слипаясь, составляют рыхлую структуру метеороида, имеет значения $2\text{--}3 \text{ г/см}^3$ (как и плотные каменные метеорных тел), их размеры – от десятков до сот микрометров. Плотность же рыхлого метеорного тела может быть менее 1 г/см^3 .

О структуре и составе метеорных тел можно судить не только по спектрам метеоров, но и по метеоритам. По составу они делятся на каменные, железные и железо-каменные. Наиболее часто встречаются каменные метеориты, которые состоят из силикатов: оливинов и пироксенов. Большинство каменных метеоритов являются хондритами, так как содержат хондры – сферические или эллиптические образования преимущественно силикатного состава. Ахондриты – это обломки



Орбита кометы с фрагментами тел и орбита Земли

протопланетных тел, прошедшие плавление и дифференциацию вещества по составу (на металлы и силикаты). Железные метеориты состоят из железо-никелевого сплава и встречаются достаточно редко. На метеоритах можно заметить так называемые регмалипты – вытянутые ямки, образованные из-за сверлящего действия турбулентного потока воздуха, обтекающего метеорное тело [5].

Несмотря на сложность регистрации метеороидов, ученые весьма преуспели в понимании явлений, связанных в этими небесными телами. Однако, еще много загадок предстает решить впереди. Интерес в их изучении является не только теоретическим, но также и практическим. В результате пролета метеорных тел могут пропадать радио сигналы, а финальное падение метеоритов на Земли в случае крупных метеорных тел может нанести разрушающие последствия. Поэтому изучение метеоров оказывается очень важным.

Литература

1. Астапович И.С. Метеорные явления в атмосфере Земли. М., 1958.
2. Бронштэн В.А. Метеоры. Метеориты. Метеороиды. М.: Наука, 1987.
3. Keay C.S.L. Anomalous sounds from the entry of meteor fireballs // Science. 210. 11–15. 1980.
4. Richard Spalding, John Tencer, William Sweatt, Benjamin Conley, Roy Hogan1, Mark Boslough, GiGi Gonzales & Pavel Spurný. Photoacoustic sounds from meteors // Scientific Reports volume7, Article number: 41251 (2017).
5. Кринов Е.Л. Инструкция по наблюдению падений, поискам и сбору метеоритов. М.: Изд-во АН СССР, 1950.

ВУЛКАНЫ ИО ПРОДОЛЖАЮТ НЕПРЕРЫВНО ИЗВЕРГАТЬСЯ УЖЕ 4.5 МИЛЛИАРДА ЛЕТ

DOI: 10.7868/50044394824020087

Группа ученых из Калифорнийского технологического института, Центра космических полетов имени Годдарда и Калифорнийского университета в Санта-Барбаре (США) пришли к выводу, что вулканы на спутнике Юпитера Ио продолжают непрерывно извергаться вот уже на протяжении 4.57 миллиарда лет – т.е. с момента образования спутника планеты-гиганта.

Этот вывод ученые сделали на основе изучения соотношения изотопов

серы и хлора в атмосфере Ио при помощи анализа данных, полученных в настоящее время наземным телескопом ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array – Атакамская Большая Миллиметровая/субмиллиметровая Решетка). О результатах своих исследований авторы сообщают в апрельском номере журнала *Science*, исследование стало главной темой номера.

Спутник Юпитера Ио – самое вулканически активное небесное тело в Сол-

нечной системе. Считается, что такая активность связана с гравитационным взаимодействием с гигантским Юпитером и другими его спутниками, соседями Ио – Европой и Ганимедом. Приливное взаимодействие настолько разогревает недра Ио, что на его поверхности одновременно действуют более 200 вулканов. Согласно еще одной гипотезе, разогрев настолько силен, что под поверхностью Ио на глубине 50 м находится глобальный океан магмы, который вырывается на поверхность в виде вулканических извержений.

В своем нынешнем исследовании авторы решили выяснить, когда на Ио начался период вулканической активности.

Фото Ио, сделанное 30 декабря 2023 года межпланетной автоматической станцией NASA «Юнона» на расстоянии примерно 1500 км от поверхности спутника Юпитера. Изображение: NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS Image processing by Emma Wälimäki © CC BY



Во время извержения вулканов в атмосферу выделяются газы, затем они улетучиваются в космос. Зная, с какой скоростью происходит это убежание, и учитывая соотношение легких и тяжелых изотопов, авторы построили модель, которая позволила рассчитать, как интенсивно шло извержение вулканов на Ио и как давно начались эти процессы.

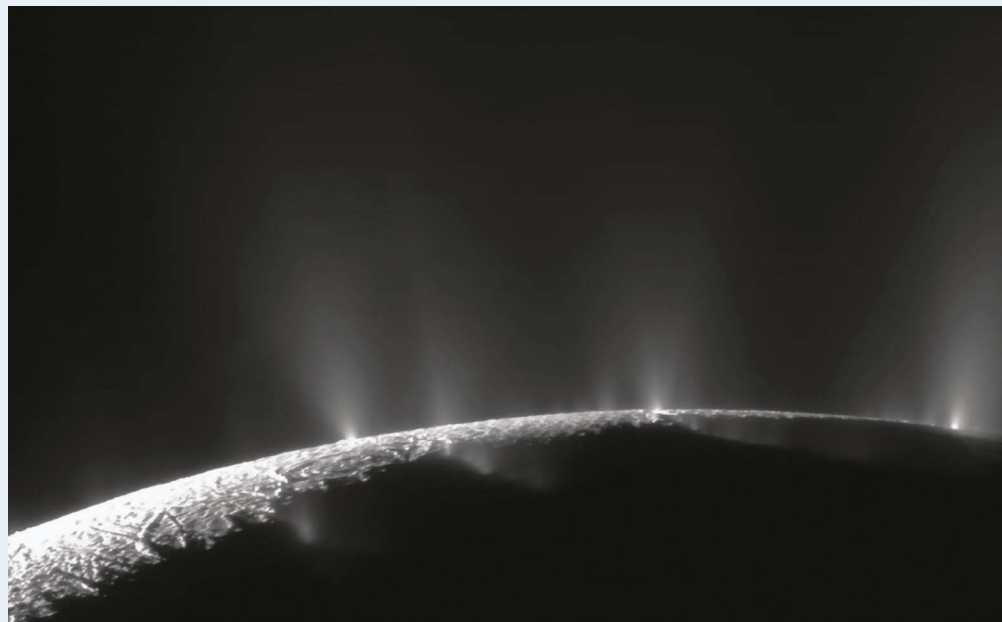
«Мы исходили из гипотезы, что изотопный состав летучих веществ в атмосфере Ио, в том числе соединений серы и хлора, отражает историю извержения его вулканов. Мы измерили соотношение этих изотопов и обнару-

жили, что выбросы вулканов Ио в атмосферу содержат в себе очень много тяжелых форм и того и другого элемента. Это означает, что, вероятно, практически все легкие изотопы просто улетучились в космос. Это говорит о том, что вулканы на Ио были чрезвычайно активными на протяжении долгого времени – всей истории существования данного мира», – пишут исследователи.

Katherine de Kleer et al. Isotopic evidence of long-lived volcanism on Io. Science 384, 682–687(2024). DOI:10.1126/science.adj0625

АКТИВНОСТЬ ГЕЙЗЕРОВ НА ЭНЦЕЛАДЕ РЕГУЛИРУЕТ ДВИЖЕНИЕ ЛЬДА

DOI: 10.7868/50044394824020099



Фотография гейзеров на Энцеладе, полученная аппаратом NASA «Кассини» в ноябре 2009 г.
Источник: NASA/JPL/Space Science Institute

Группа американских планетологов из Калифорнийского технологического института предложила гипотезу, которая объясняет, почему активность гейзеров на южном полюсе спутника Сатурна Энцеладе происходит с определенной периодичностью.

О результатах своей работы авторы сообщают в апрельском номере журнала *Nature Geoscience*.

Известно, что интенсивность выбросов воды из океана Энцелада меняется каждые 32 часа – а это продолжительность суток на спутнике. В этом же ритме за счет приливного взаимодействия двигаются льды, покрывающие его океан. Соответственно, размер полыней ледяного панциря Энцелада увеличивается или уменьшается. В результате уменьшается или увеличивается интенсивность выбросов гейзеров из океана. Такую гипотезу предлагают авторы нового исследования.

«Проведенный нами анализ данных зонда “Кассини” за 2019 г. показал, что приливные силы и прочие взаимодействия между Энцеладом и Сатурном порождают периодические сдвиговые перемещения льдов, покрывающих южный полюс Энцелада, внутри так называемых “тигровых полос”. Эти движения влияют на интенсивность извержения гейзеров Энцелада и объясняют два суточных пика их активности», – пишут планетологи.

Огромный интерес к Энцеладу появился в 2004 г., когда межпланетная станция «Кассини» (NASA) обнаружила на его южном полюсе гигантские гейзеры, которые достигают высоты 250 км.

Это струи из частиц водяного льда и пара, которые выбрасываются в космическое пространство из параллельных трещин – так называемых «тигровых полос». Тогда это открытие поставило перед учеными вопрос об источнике этого пара и льда.

Через 10 лет эту загадку также решил «Кассини» – зонд обнаружил в недрах Энцелада глобальный океан из жидкой и горячей воды. А как показали современные исследования, этот океан должен быть еще и очень соленым и щелочным. Он покрыт слоем льда толщиной, предположительно, от 5 до 2 километров.

Тогда же в выбросах гейзеров «Кассини» нашел углекислый газ и водород. Но вот настоящей сенсацией стало обнаружение в 2018 г. в гейзерах Энцелада сложных органических молекул: бензола, метана и др., – которые могли явно свидетельствовать если не о самой жизни, то об условиях, при которых она может существовать.

В настоящее время астробиологи считают, что набор сложных органических молекул, отсутствие света, наличие водорода и углекислого газа могут говорить о возможности существования в океане Энцелада метаногенных архей – наиболее древних микроорганизмов, вполне способных выживать в такой среде.

Все это делает Энцелад одной из интереснейших целей для изучения с точки зрения астробиологии, а сам спутник может считаться наиболее подходящим местом для существования там внеземной жизни.

Berne, A., Simons, M., Keane, J.T. et al. Jet activity on Enceladus linked to tidally driven strike-slip motion along tiger stripes. Nat. Geosci. 17, 385–391 (2024).

<https://doi.org/10.1038/s41561-024-01418-0>

Postberg, F., Khawaja, N., Abel, B. et al. Macromolecular organic compounds from the depths of Enceladus. Nature 558, 564–568 (2018).

<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0246-4>

Подготовила А. Ф. Говорова

EARTH & UNIVERSE

2 (356), 2024

March–April

TABLE OF CONTENT:

Lev M. ZELENYI Editorial	3
Lev M. ZELENYI, Anatolyi A. PETRUKOVICH, Dmitry S. ZARUBIN Manned Space Complexes For Space Experiments	7
Mikhail Yu. BELYAEV Earth Studies In the <i>Uragan</i> Experiment	24
Oleg F. PETROV, Andrey V. ZOBININ, Andrey M. LIPAEV, Alexander D. USACHEV <i>Plasma Crystal 4</i> Space Experiment	44
Vyacheslav A. SHURSHAKOV, Olga A. IVANOVA, Ivan S. KARTSEV Witnessing Phantoms, Cosmonauts, And Radiation	63
Igor G. MITROFANOV, Maxim L. LITVAK, Dmitry V. GOLOVIN, Alexander S. KOZYREV, Maxim I. MOKROUSOV, Alexey N. PEKOV, Vladislav I. TRETYAKOV <i>BTN-Neutron</i> Experiment: Radiation Background On-Board the ISS and ROS	77
Alexander V. IPATOV, Leonid A. VEDESHIN, Sergey A. GERASYUTIN Space Junk Monitors And the Future Of the Near-Earth Space Exploration	91
Tatyana I. MOROZOVA What Do Meteors Sing About?	109
In Brief	
Io Volcanos Have Been Continuously Erupting For 4.5 Billion Years	116
Ice Movements On Enceladus Control Geysers' Activity	117

Cover image: On March 30, 2022, after undocking from the International Space Station, the crew of the manned Soyuz MS-19 spaceship made photos of the Russian Segment of the ISS in its final configuration and the ISS in the whole. Press Service of the Russian State Space Corporation ROSCOSMOS thanks S. P. Korolev Energia Rocket and Space Corporation and Mission Control Center of the Central Research Institute for Machine Building (parts of State Space Corporation ROSCOSMOS) for running this operation and the photographs! Photo: State Space Corporation ROSCOSMOS, <https://www.roscosmos.ru/34760/>

Индекс 38808

Земля и Вселенная, 2/2024

Заведующая редакцией А.Ю. Обод

Редакторы С.А. Герасютин, Д.А. Кононов, О.С. Сажина

Корректор С.О. Розанова

Верстка макета Н.В. Мелковой

Просим обращаться

по вопросам публикации материалов:

+7(495) 276-77-35 (доб. 42-31), e-mail: zevs@naukapublishers.ru

по вопросам сотрудничества:

+7(495) 276-77-35 (доб. 43-01 или 43-02),

e-mail: journals@naukapublishers.ru

Журнал зарегистрирован Государственным комитетом

Совета министров СССР по печати 28 июня 1991 г.

Свидетельство о регистрации № 2119

www.naukabooks.ru/zhurnali/katalog/zemlja-i-vselennaja/

Все права защищены.

Перепечатка материалов возможна только с разрешения редакции.

Мнение редакции может не совпадать с мнением автора.

Все иллюстрации в статьях предоставлены авторами.

*Ответственность за точность и содержание рекламных
материалов несут рекламодатели*

12+

Сдано в набор 29.04.2024 Подписано к печати 13.06.2024

Дата выхода в свет 27.06.2024 Формат 70 × 100¹/₁₆

Цифровая печать Усл.печ.л. 9,75 Уч.-изд.л. 9,75 Бум.л. 3.75

Тираж 148 экз. Заказ № 190 Цена свободная

Учредители: РАН, ФГБУ «Издательство «Наука»

Редакция и издатель: ФГБУ «Издательство «Наука»

Адрес: 121099, Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1

Отпечатано в типографии ФГБУ «Издательство «Наука»

Адрес: 121099, Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1



НАУКА

— 1727 —

ПОКУПАЙТЕ ДЕШЕВЛЕ В ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИНЕ



КНИГИ



ЖУРНАЛЫ



ые альманахи - «Академкнига». Официальный интернет-магазин и сайт сети магазинов

ЖУРНАЛОВ О СЕТИ «АКАДЕМКНИГА» ИЗДАТЕЛЬСТВО

ьманахи

е альманахи

ны выпуски альманахов «Природа», «Океанология» и «Жизнь». Выбранные для дайджестов статьи рассчитаны на самую широкую аудиторию.

Подписка на журналы

Электронная библиотека журналов

Интерактивные альманахи

О магазине

- Доставка и оплата
- Контакты
- Адреса магазинов сети
- Электронные версии
- Регистрация

ИК
ТЕЧЕСКИЙ

альманах
ОКЕАНОЛОГИЯ

альманах
ПРИРОДА

www.naukabooks.ru



ИЗДАТЕЛЬСТВО "НАУКА"
121099, г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1
тел.: +7 (495) 276-77-35
info@naukapublishers.ru
naukapublishers.ru

ISSN 0044-3948



9 770044 394007